УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

приоритет2030
лидерами становятся

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

ТОМ 1

Материалы
XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 25 – 29 ноября 2024 г.)



Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 1

Материалы
XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции

(г. Уфа, 25 – 29 ноября 2024 г.)

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа
Уфимский университет
2025

УДК 629.7+621.1+531/532+33.055
ББК 39.5+31.36+22.2+65.290
М12

Публикуется по решению ученого совета
факультета авиационных двигателей, энергетики и транспорта УУНиТ.
Протокол № 10 от 26.05.2025 г.

Редакционная коллегия:
канд. техн. наук **О.Н. Иванова** *(отв. редактор)*;
старший преподаватель **А.Х. Рахимов** *(секция 1.1, 1.2)*;
канд. техн. наук, доцент **Р.Д. Каримов** *(секция 1.3)*;
канд. техн. наук, доцент **Р.Ю. Сакулин** *(секция 1.4)*;
старший преподаватель **Р.И. Шайхутдинов** *(секция 1.5)*;
канд. техн. наук **Д.В. Целищев** *(секция 1.6)*;
инженер кафедры ПГМ **Е.Э. Бикмухаметова**

Мавлютовские чтения: материалы XVIII Всероссийской молодёжной науч-
М12 ной конференции (г. Уфа, 25–29 ноября 2024 г.) / отв. ред. О.Н. Иванова / в 9 т. Т. 1. [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2025. – 437 с. – URL: https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2025/145.pdf – Загл. с титула экрана.

ISBN 978-5-7477-6015-8
Том 1: ISBN 978-5-7477-6142-1

В 1-й том сборника материалов конференции вошли статьи секций 1.1–1.6.
Сборник предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей.
Все материалы представлены в авторской редакции.

УДК 629.7+621.1+531/532+33.055
ББК 39.5+31.36+22.2+65.290

ISBN 978-5-7477-6142-1 (том 1)
ISBN 978-5-7477-6015-8
© Уфимский университет, 2025

СЕКЦИЯ 1.1. КОНСТРУКЦИЯ, ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.7

Н.А. АНТРОПОВ
nikita_antropov_2003@mail.ru
Науч. руководитель – зав. кафедрой А.В. ЗЫРЯНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ВЕРТОЛЕТ С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ПРЕИМУЩЕСТВА

Аннотация. Современные вертолёты в основном оснащаются традиционными авиационными двигателями, такими как поршневые (ПД) и турбовальные. Перспективы развития вертолётостроения связываются с внедрением гибридных силовых установок (ГСУ). Такие системы объединяют различные компоненты, включая тепловые двигатели, электродвигатели (ЭД), аккумуляторные батареи (АКБ), топливные элементы, генераторы и другие устройства. Увеличение сложности силовой установки (СУ) должно быть обосновано как с технической, так и с экономической точки зрения, чтобы оценить целесообразность включения.
Ключевые слова: гибридная силовая установка, вертолет, гибридный вертолет.

Введение

В последние годы значительно возросло число проектов, связанных с разработкой частично или полностью электрифицированных воздушных судов, а также их силовых установок. Научно-исследовательские институты и ведущие авиастроительные компании активно занимаются внедрением электрических источников энергии в конструкцию летательных аппаратов.

В качестве аналогичного примера можно привести процесс электрификации автомобильного транспорта. За последние годы гибридные и электрические силовые установки, появившиеся в автомобильной индустрии сравнительно недавно, продемонстрировали значительное улучшение ключевых технических характеристик. Однако основное отличие автомобильного транспорта от авиации заключается в особенностях рабочего цикла. Для автомобилей, где он включает множество разгонов и остановок, возможно использование рекуперации энергии, что позволяет увеличить запас хода без значительного увеличения емкости и массы аккумуляторной батареи (АКБ). В авиации рабочие циклы силовых установок не предусматривают таких возможностей, что предъявляет повышенные требования к удельным характеристикам АКБ. Ограниченные показатели этих характеристик на

данном этапе остаются главным препятствием для широкого внедрения гибридных силовых установок (ГСУ) в летательные аппараты.

Область применения вертолетов с ГСУ

На данный момент, самым удачным вариантом для установки ГСУ на вертолет является легкий класс вертолетов. Связанно это с тем, что промышленность (как отечественная, так и зарубежная) освоила к настоящему моменту выпуск электромашинных агрегатов удельной мощностью до 8 кВт/кг при мощности на валу электродвигателя или генератора до 1 мВт. Такие электромашинные агрегаты уже сегодня могут быть установлены на легкие вертолеты в рамках создания их гибридных версий. Так же важным фактором выбора легкого и сверхлегкого класса вертолетов является тот факт, что, имея на борту два источника энергии (тепловой двигатель и АКБ), нет необходимости оснащать вертолет дополнительными средствами безопасности, такими как внешние подушки безопасности и тому подобные устройства.

Старшие по классу вертолеты оснащены двумя двигателями и способны выполнить посадку даже на одном из них, а установка второго двигателя на легкие вертолеты экономически нецелесообразно.

Виды ГСУ, их различия и преимущества.

В данной работе рассматриваются следующие схемы силовых установок:

– ГСУ последовательной схемы на основе одного турбовального газотурбинного двигателя (ТВГТД);

– ГСУ параллельной схемы на основе двух газотурбинных турбовинтовых двигателей (ГТВД).

ГСУ последовательной схемы на основе одного газотурбинного двигателя (ГТД). ГСУ включает в себя один турбогенератор на основе ТВГТД и вращаемого им электрического генератора. Электрическая энергия от генератора передается на два электрических двигателя, вращающих воздушные винты. Кроме того, ГСУ включает в себя дополнительный источник электрической мощности – АКБ. На крейсерском режиме АКБ заряжается от турбогенератора. Располагаемая мощность и энергоемкость АКБ выбирается из условия компенсации отказа турбогенератора при взлете летательного аппарата (ЛА) и обеспечения безопасного набора высоты, полета и посадки.

Преимущество ГСУ последовательной схемы перед традиционной силовой установкой (СУ) заключается в том, что газотурбинный двигатель может быть оптимизирован под крейсерский режим полета. Благодаря этому снижается его масса и удельный расход топлива. К тому же двигатель становится однорежимным, что увеличивает его ресурс и отказоустойчивость. Стоимость владения и обслуживания подобной СУ в сравнении с традиционной теоретически должна быть ниже из-за того, что газотурбинный двигатель только один.

ГСУ параллельной схемы на основе двух гибридных ГТД. Рассматривается силовая установка, оснащенная двумя так называемыми гибридными турбовинтовыми двигателями. ГТД имеет в своем составе обратимую электрическую машину, которая может эффективно работать как в

режиме двигателя, так и в режиме генератора. В режиме двигателя обратимой электрической машины (ОЭМ) может передавать дополнительный крутящий момент на винт. Возможны различные способы установки такой электрической машины, например через муфту свободного хода на валу свободной турбин. В крейсерском полете АКБ заряжается в течение заданного времени, при этом газотурбинные части ГТВД работают с несколько повышенной мощностью, обеспечивая заряд АКБ от ОЭМ, работающих в режиме генератора. На остальных этапах полета (кроме взлета и набора высоты) АКБ не используется.

Стоит отметить, что масса гибридной силовой установки (ГСУ) обычно превышает массу традиционной СУ. Это приводит к увеличению посадочной массы ЛА) что, в свою очередь, приводит к уменьшению максимальной дальности полета по сравнению с базовой версией вертолета.

Схема ГСУ используемая в расчетах

Схема ГСУ используемая в расчетах ЛТХ вертолета

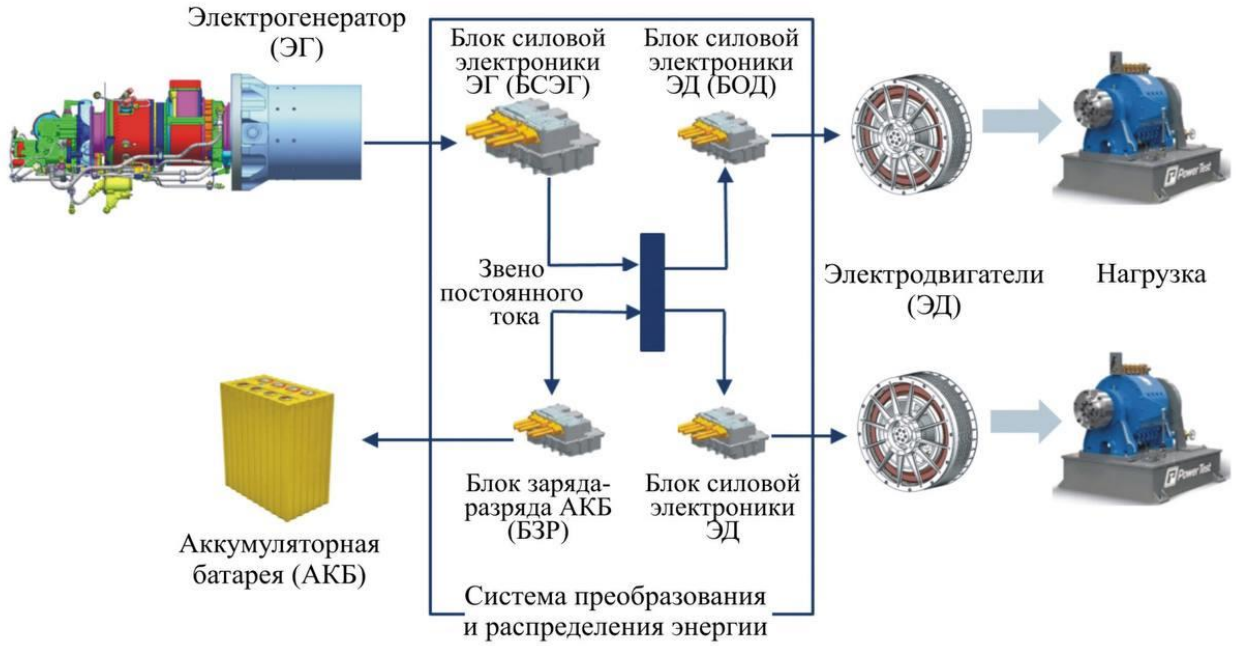


Рис. 1. Схема ГСУ

Таблица 1

Название агрегата	ЭГ	ЭД	АКБ	БСЭ	Кабели	Сумма
Масса, кг	80	$70 \times 2 = 140$	140	60	20	440

Расчет ЛТХ вертолета в составе с ГСУ последовательной схемы и сравнение с ЛТХ вертолета классической схемы

Взлётная масса вертолёта второго приближения для вертолета Ансат классической схемы будет равна:

$$m_{02кл.с.} = m_{пуст} + m_{т} + m_{пн} + m_{эк} =$$
$$= 2006 + 1056 + 593 + 90 = 3745 \text{ кг}.$$

Для расчета массы вертолета с ГСУ вычтем из массы вертолета классической схемы массу: главного редуктора $(m_{\text{гл.р.}} = 229\ \text{кг})$, промежуточного и хвостового редуктора $(m_{\text{пр.р.}} = 23\ \text{кг}, m_{\text{х.р.}} = 20\ \text{кг})$ и добавим массу ГСУ $(m_{\text{ГСУ}} = 440\ \text{кг})$, посчитанную выше. Получим что взлётная масса вертолёта второго приближения для вертолета Ансат с ГСУ будет равна

$m_{02\text{ГСУ}} = 3913\text{кг}$

Чтобы сохранить взлетную массу вертолета, вычтем разницу масс между вертолетом с ГСУ и вертолетом с классической схемой из расчетной массы топлива. В следствии этого уменьшится дальность полета вертолета с $L_{max.\text{кл.с.}} =$
$= 535\text{км}$ до $L_{max.\ \text{ГСУ}} = 450\text{км}$.

Выводы

Вертолеты с гибридными силовыми установками представляют собой многообещающую технологию, способную значительно изменить рынок авиации. Они находят применение во множестве областей, от гражданской до военной авиации, благодаря своей эффективности и экологичности. Однако необходимо преодолеть существующие недостатки, чтобы полностью реализовать их потенциал. В дальнейшем развитие технологий и рост интереса к устойчивым решениям может привести к более широкому внедрению ГСУ в авиационную практику.

Библиографический список

1. Проектирование вертолетов: Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Проектирование вертолетов» / УГАТУ; Сост.: Б.Р. Абдуллин, А.В. Зырянов. – Уфа, 2015 г. – 44 с.

2. А.Д. Едигарев, М.В. Шемет, В.А. Елисеев исследование возможности повышения ресурсных показателей газотурбинного двигателя в составе гибридной силовой установки последовательного типа // Вестник ПНИПУ. – Санкт-Петербург: 2024

3. Д.А. Бондаренко, Ю.А. Равикович влияние применения гибридных силовых установок на летно-технические и эксплуатационные характеристики легких вертолетов // Вестник Московского авиационного института. – Москва: 2024

4. Как работают силовые установки и какие разработки существуют в настоящее время // Ростех URL: https://rostec.ru/media/news/dvoynoe-serdtse-gibridnye-dvigateli-dlya-aviatsii/#start (дата обращения: 18.11.2024).

© Антропов Н.А., 2024

УДК 629.7

А.С. БАТМАНОВ
tosha.batmanov@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.И. ЖУК

Уфимский университет науки и технологий

УСТАНОВКА КРЫЛА НА ВЕРТОЛЕТ МИ-26

Аннотация: для улучшения летно-технических характеристик используются различные методы, одним из которых является внесение изменений в конструкцию летательного аппарата.
Ключевые слова: летательный аппарат, вертолет, характеристики, крыло, методы, конструкция.

Одним из ключевых компонентов изменения конструкции является установка крыла, которое играет огромную роль в обеспечении аэродинамических качеств и характеристик вертолета.

Крыло предназначено, чтобы увеличить подъемную силу вертолета. Когда вертолет движется в воздухе, благодаря форме крыла создается различное давление воздуха сверху и снизу крыла. Поскольку верхняя поверхность крыла обычно имеет большую кривизну, воздух над ней проходит быстрее, что создает зону низкого давления. Снизу крыла давление выше. Эта разница в давлении создает подъемную силу, поддерживающую вертолет в воздухе. За счет дополнительной подъемной силы на крыле удается разгрузить несущий винт, снизить общий шаг винта, однако в режиме висения крылья создают дополнительное сопротивление нисходящему воздушному потоку от несущего винта, тем самым снижая устойчивость.

Крыло не обязательно для вертолета, хотя несколько увеличивает дальность крейсерского полета, повышает наибольшую скорость и грузоподъемность, но на режимах висения, вертикальных перемещений и малых скоростей горизонтального полета оно уменьшает весовую отдачу летательного аппарата. Кроме того, крыло несколько улучшает балансировку и устойчивость вертолета, а при соответствующих размерах может быть использовано для размещения в нем топливных баков и убирающегося в полете шасси, (например, на Ми-24 – у этого вертолета роль дополнительных крыльев выполняют пилоны подвесного оружия).

Основными элементами крыла являются его профиль и форма поперечного сечения, которые определяют аэродинамические характеристики крыла.

Крыло вертолета обычно состоит из металлического или композитного каркаса, который придает прочность и жесткость. Он соединяется с фюзеляжем вертолета с помощью кронштейнов. Продольные силовые элементы,

называемые лонжеронами, а также параллельные им стрингеры и поперечные нервюры создают форму крыла.

Величина и направление аэродинамических сил, которые действуют на крыло, в значительной степени определяются формой профиля крыла, внешней формой в плане и видом спереди. Наибольшее распространение получили трапециевидные, прямые и стреловидные крылья. Плоскости симметрии крыльев обычно совпадают с плоскостями симметрии вертолета. Ниже приведены основные геометрические характеристики крыла.

Профилем крыла называется форма его поперечного сечения. Существуют различные формы аэродинамических крыльев. Профили могут быть симметричными и несимметричными. Несимметричные профили, в свою очередь, делятся на двояковыпуклые, плосковыпуклые, вогнутые и *S*-образные (рис. 1).

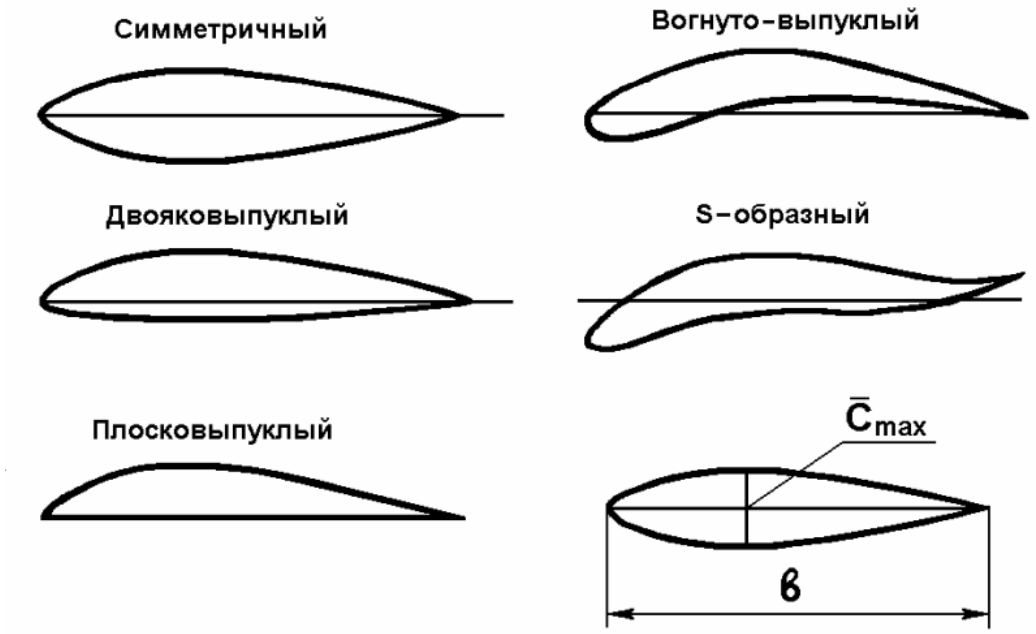


Рис. 1. Форма, хорда, толщина профиля крыла

Крыльевые профили характеризуются следующими основными параметрами: величиной хорды, относительной толщиной и относительной кривизной.

Хорда профиля крыла – отрезок прямой, соединяющий ребро атаки с ребром обтекания (рисунок 2). Хорда обозначается буквой в.

Толщина профиля C крыла измеряется длиной отрезка между его верхним и нижним контурами перпендикулярно хорде в. Относительной толщиной профиля называется отношение его максимальной толщины C_{max} к хорде в, выраженное в процентах:

$$\bar{C} = \frac{C_{max}}{\text{в}} * 100\%.$$

Относительная толщина профилей современных крыльев равна 8–16%.

Существенным геометрическим параметром профиля является его кривизна, которая характеризуется кривизной средней линии профиля. Средней

линией профиля называется линия, соединяющая середину отрезков профиля, перпендикулярных хорде. Кривизной профиля f называется расстояние между хордой и средней линией профиля (рисунок 2).

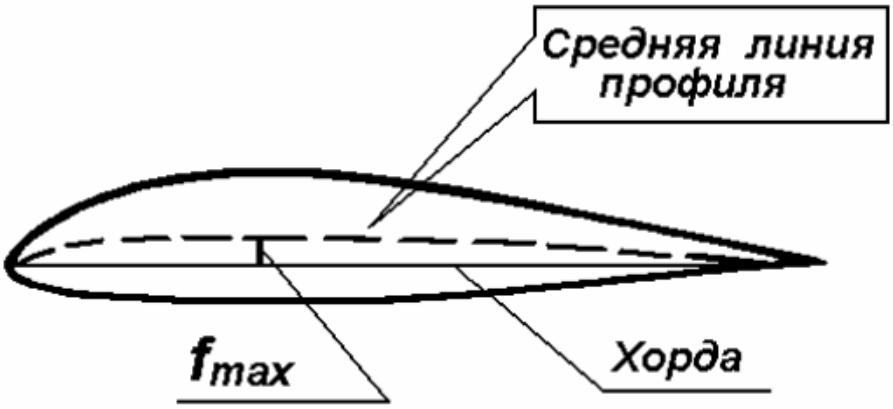


Рис. 2. Кривизна профиля

Отношение максимальной кривизны к хорде, выраженное в процентах, называют относительной кривизной профиля

$$\bar{f} = \frac{f_{max}}{B} * 100\%.$$

Если $\bar{f}$ = 0, то это означает, что профиль симметричный. Относительная толщина современных профилей равна от 0 до +2%.

По форме в плане крылья делятся на прямоугольные, трапециевидные, эллипсовидные и стреловидные (рисунок 3).

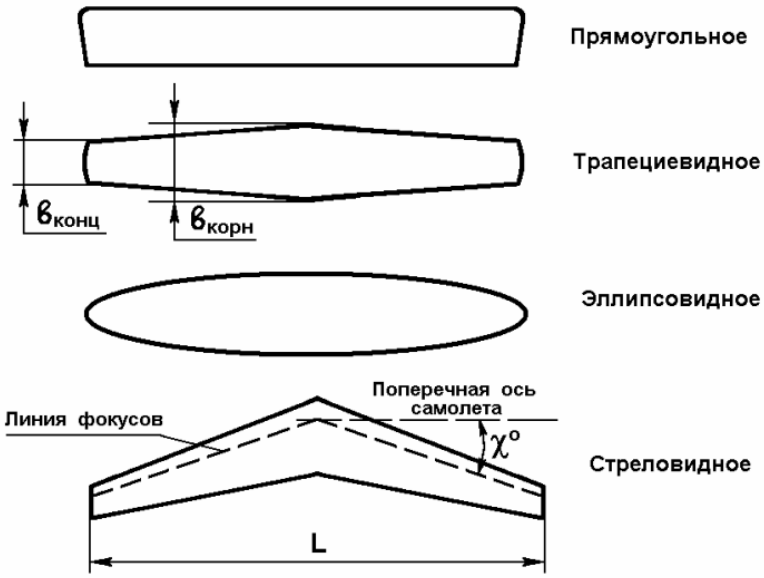


Рис. 3. Формы крыльев в плане

Эллипсовидные крылья обладают наилучшим аэродинамическим качеством, но из-за сложности производства они широкого распространения не получили. Трапециевидное крыло является наиболее распространенной формой крыла.

Форма крыла в плане характеризуется размахом, площадью, удлинением и сужением.

Размахом (L) называется расстояние между концами крыла. Площадью крыла (S) называется площадь, ограниченная контуром крыла в плане. Сужением называется отношение корневой хорды $\mathbf{B_{корн}}$ к концевой $\mathbf{B_{конц}}$:

$$\eta = \frac{\mathbf{B_{корн}}}{\mathbf{B_{конц}}}$$

Сужение современных крыльев в среднем равно 2 – 3.

Удлинением крыла (λ) называется отношение размаха крыла к средней аэродинамической хорде (САХ), то есть

$$\lambda = \frac{\ell}{\text{САХ}} = \frac{\ell^2}{S}$$

Одним из методов улучшения летно-технических характеристик вертолета является установка дополнительного горизонтального оперения. Благодаря ему получится разгрузить несущий винт, увеличить подъемную силу, допустимую нагрузку, максимальную и крейсерскую скорости, снизить расход топлива.

Библиографический список

1. Современные авиационные конструкционные сплавы: Учеб. пособие / В.Н. Климов, Д.М. Козлов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 40 с.

2. Дудник В.В., Конструкция вертолетов. – Ростов н/Д: Издательский дом ИУИ АП, 2005. – 158 с.

3. Далин В.Н., Михеев С.В. Конструкция вертолетов: Учебник. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 352 с.

4. Корнеев В.М. Конструкция и основы эксплуатации летательных аппаратов: конспект лекций / В.М. Корнеев. – Ульяновск: УВАУ ГА(и), 2009 – 130 с.

© Батманов А.С., 2024

УДК 629.7

Н.А. БИРЮКОВ
birukovnikolai98@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.И. ЖУК

Уфимский университет науки и технологий

КАРДАННЫЙ УЗЕЛ КРЕПЛЕНИЯ МЕХАНИЗМА ПРИВОДА РЕВЕРСИВНОГО УСТРОЙСТВА АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: объектом исследования данной работы является, карданный узел крепления механизма привода реверсивного устройства авиационного двигателя.
Цель работы – изучить узел крепления привода реверса обратной тяги с целью его монтажа или замены
Ключевые слова: карданный узел крепления, механизм привода РУ, реверсивное устройство, авиационный газотурбинный двигатель, реверс обратной тяги.

Реверсивные устройства (РУ) – предназначены для изменения направления тяги двигателя в обратную сторону путем её направления сторону полёта. В основном РУ используется в качестве «аэродинамического тормоза» они могут быть использованы на обледенелых, мокрых и коротких ВПП с целью уменьшения пробега, а также на военных самолетах с целью улучшения манёвренности

Существуют различные конструкции РУ, но функционально их можно разделить на те, в которых изменение направления тяги происходит до входа в сопло, их классифицируют как устройства давления, в таких устройствах изменение направления рабочего тела происходит благодаря перекрытию входа в сопло створками, которые воспринимают поток, дальнейшее его направление задают решетками или дополнительными створками.

Реверсивные устройства, в которых изменение и направления реактивной струи происходит за соплом называют устройствами скорости. В таких устройствах изменение направления потока происходит створками-ковшами.

Пример РУ ковшового типа показ на рис. 1

РУ ковшового типа установлен на двух силовых балках 1, закрепленных на корпусах 2, 3 и сопле 4. В балках стоят гидроцилиндры, связанные с гидросистемой самолета. Гидроцилиндры служат для поворота створок 5 за передние рычаги 6. Створки 5 вместе с передними рычагами 6, задними рычагами 7 и балками 1 образуют четырёхзвенник. На режиме «Прямая тяга» створки 5 устанавливаются над корпусом 3 и соплом 4 за противопожарной перегородкой 7 и являются продолжением мотогондолы самолета.

Противопожарная перегородка 7 служит для предотвращения попадания горячих газов в подкапотное пространство на режиме реверсирования. Так же в конструкцию входят устройства, обеспечивающие включение РУ только на режиме «Малый газ» и устройства, предотвращающие неожиданную переход створок в положение «Обратная тяга».

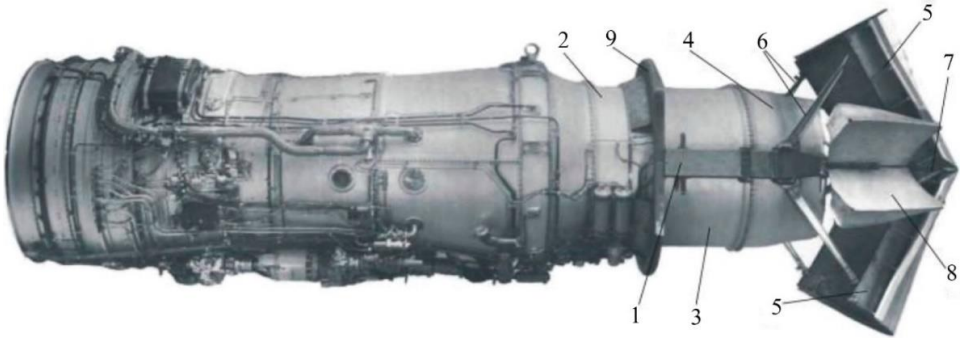


Рис. 1. РУ ковшового типа двигателя Д-30 КУ в положении «Обратная тяга»:
1 – балка силовая; 2, 3 – корпус; 4 – сопло; 5 – створки; 6 – рычаги передние;
7 – рычаги задние; 8 – обтекатель; 9 – противопожарная перегородка.

Реверсивные устройства створчатого типа. Пример РУ створчатого типа в положении обратной тяги показано на рисунке 2. Створки 1 одновременно выполняют роль элементов, перекрывающих канал наружного контура и отклоняющих струю воздуха в нужном направлении, и выполнены в виде жесткой коробчатой конструкции. Верхняя часть створки в закрытом положении образует гладкую поверхность мотогондолы, а внутренняя поверхность образует стенку канала наружного контура. Каждая из четырех створок приводится в движение с помощью гидроцилиндров 2. Для герметизации канала на режиме прямой тяги по контуру створок устанавливают резиновые уплотнения 3. В передней части реверсивного устройства расположено силовое кольцо 4, к которому крепятся силовые гидроцилиндры, агрегаты управления и трубопроводы. Силовое кольцо с помощью стоек 5 связано с внутренней оболочкой реверсивного устройства, которая образует стенку канала наружного контура и в которой имеются люки 6 для обслуживания газогенераторной части двигателя при открытых створках во время стоянки самолета.

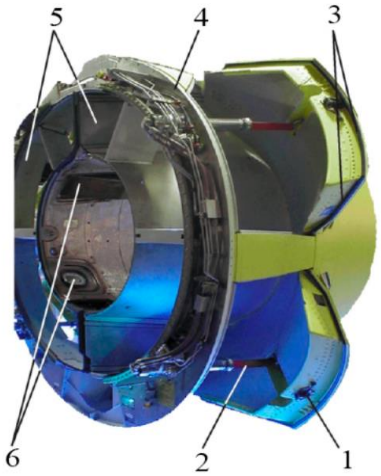


Рис. 2. Реверсивное устройство створчатого типа:
1 – створка; 2 – гидроцилиндр;
3 – уплотнение створки; 4 – силовое кольцо; 5 – стойки; 6 – лючки

Реверсивные устройства решетчатого типа

РУ решетчатого типа можно разделить на два класса:

– РУ с реверсированием потока наружного контура – применяются на двигателях со степенью двухконтурности больше 4;

– РУ с реверсированием потока в обоих контурах – применяется на двигателях со степенью двухконтурности меньше 4;

В этой работе будет рассмотрена конструкция РУ решетчатого типа с реверсированием наружного контура.

В решетчатых реверсивных устройствах в качестве элементов, отклоняющих поток, используются специальные решетки профилей, которые устанавливаются на периферии выходного устройства неподвижно или имеют возможность поворачиваться на открытие и закрытие, а для перекрытия пути движения газа в прямом направлении используются специальные створки. Так, например, у двигателей с большими степенями двухконтурности, у которых 60…70% тяги создает наружный контур, реверсирование тяги может быть осуществлено путем применения решетчатых РУ, например, по типу показанного на рис. 3. Здесь перекрывающая створка в полёте перекрывает решетку, а при посадке поворачиваются в положение, показанное на рисунке 3.

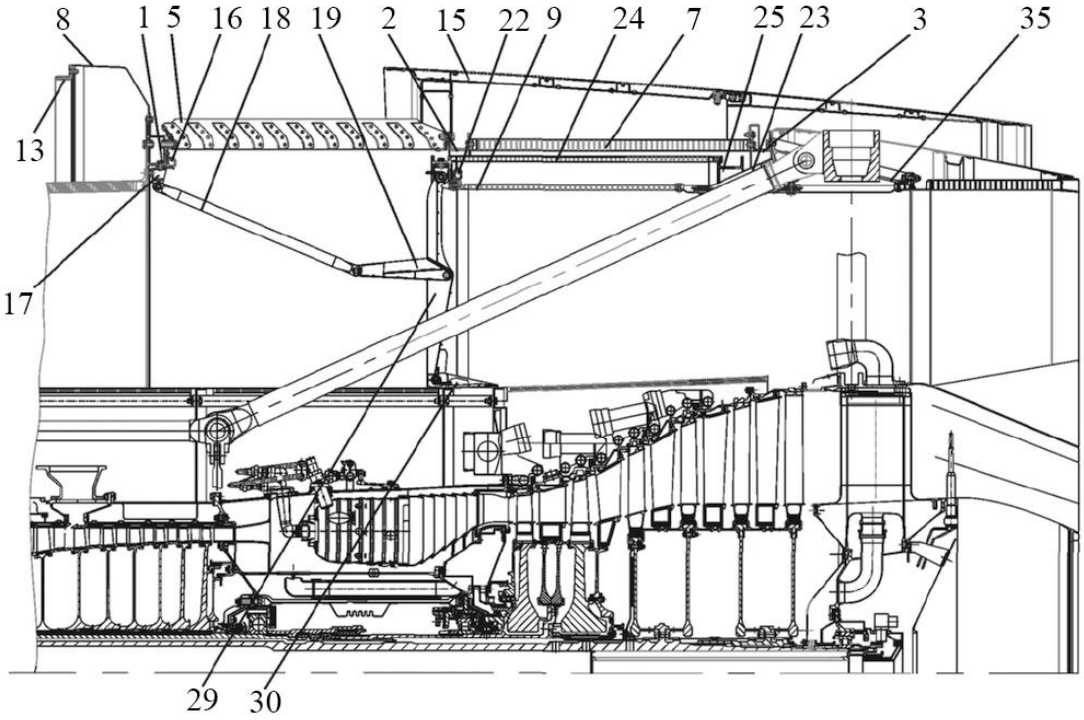


Рис. 3. Реверсивное устройство в положении «Обратная тяга»:
1 – фланец передний; 2 – среднее силовое кольцо; 3 – заднее силовое кольцо;
5 –решетка; 7 – панель; 8 – перегородка; 9 – корпус наружный задней подвески;
13 – фланец; 15 – обтекатель подвижный; 16 –уплотнение; 17 – кронштейн; 18 – тяга;
19 – канавка; 22 – уплотнение; 23 – втулка; 24 – корпус створок; 25 – кольцо;
29 – створка большая; 30 – створка малая; 35 – кронштейн

К реверсивным устройствам предъявляются следующие основные требования:

– должна обеспечиваться возможность регулирования величины реверсированной тяги;

– при выключении РУ и переходе на режим прямой тяги дополнительные потери тяги (обусловленные наличием РУ) должны практически отсутствовать;

– выхлопные газы при реверсе тяги не должны попадать на элементы планера и на вход в двигатель;

– РУ должны быть надежными в эксплуатации, иметь малый вес и приемлемую стоимость изготовления.

Одним из важных требований при обслуживании РУ является ремонтопригодность. Известно устройство карданный узел привода реверсивного устройства рис. 4, 4 а, содержащий карданный шарнир и две пары цапф, образующих оси вращения карданного механизма.

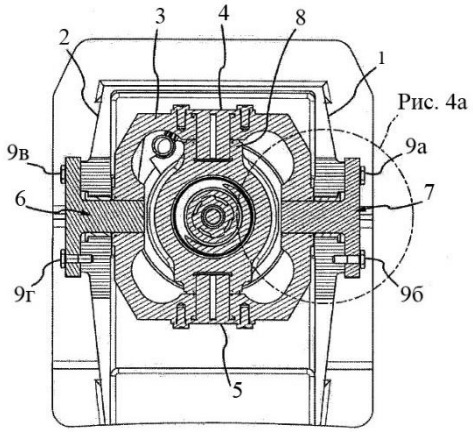


Рис. 4. Общий вид карданного механизма:
1 и 2 – передние крепления, 3 – карданный подвес, 4 и 5 – первая пара цапф, 6 и 7 – вторая пара цапф, 9 а, б, в, г – болт, 8 – выдвижной привод реверса тяги.

Недостатком известной конструкции является то, что в конструкции цапф не предусмотрены конструктивные элементы для их установки и демонтажа с изделия, что значительно увеличивает трудоемкость монтажа/демонтажа как самих цапф, так и системы привода РУ.

Технический результатом предлагаемой конструкции заключается в облегчении доступа к элементам крепления привода РУ, снижение трудоемкости сборочных и ремонтных операций.

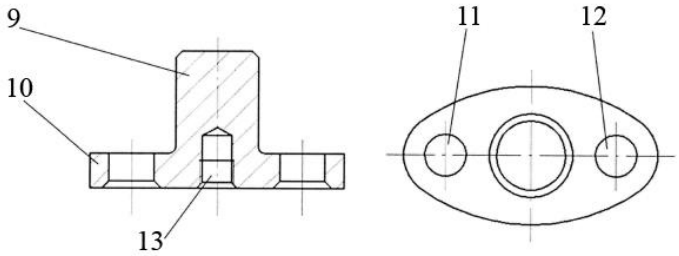


Рис. 5. Цапфа с монтажным отверстием:
9 – стержень; 10 – фланец;
13 – отверстие для инструмента; 11 и 12 – отверстия

Технический результат достигается за счет того, что в карданном узле крепления механизма привода реверсивного устройства авиационного газотурбинного двигателя рис. 6, содержащем карданный шарнир и две пары цапф, образующих оси вращения карданного механизма рис. 7, причем цапфы представляют собой выполненные единой деталью стержень и фланец, при этом во фланце выполнены отверстия для крепления цапфы, согласно полезной модели, во фланце выполнено дополнительное отверстие для монтажа/ демонтажа цапфы.

Изготовление специальных отверстий в цапфах рис. 5 дает возможность использования инструмента, например, резьбового съемника, что повышает удобство монтажа/демонтажа цапф и минимизирует риск заклинивания цапфы в процессе проведения работ. Само монтажное отверстие может быть

выполнено с внутренней резьбой для удобства крепления инструмента или без резьбы, с установкой инструмента в отверстие с натягом.

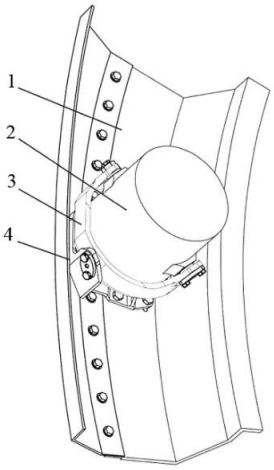


Рис. 6. Общий вид привода РУ закрепленного на неподвижной части РУ: 1 – неподвижная часть РУ; 2 –привод РУ; 3 – силовое кольцо; 4 – кронштейн

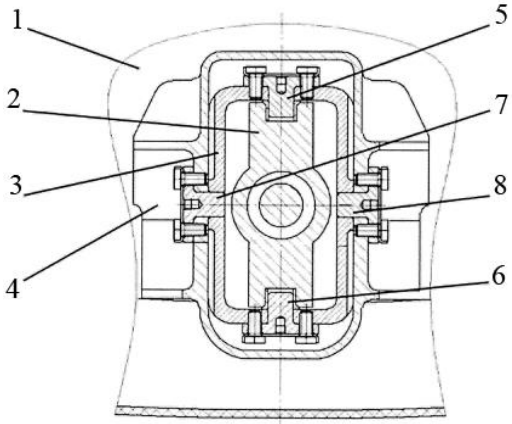


Рис. 7. Общий вид карданного механизма:
5 и 6 – первая пара цапф; 7 и 8 – вторая пара цап

Дополнительное монтажное отверстие в цапфах не оказывает влияния на технические и эксплуатационные характеристики реверсивного устройства. Заявленная полезная модель успешно прошла экспериментальные испытания и в настоящее время реализована в конструкции реверсивного устройства.

Таким образом, предлагаемая полезная модель позволяет снизить трудоемкость сборочных и ремонтных операций, облегчая доступ к элементам крепления привода реверсивного устройства.

Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели: ОАО «Авиадвигатель» Пермь 2006. – 1203 с.

2. Яндекс патент [Электронный ресурс]. *https://yandex.ru/patents/doc/RU221192U1_20231025* (дата обращения 16.11.2024).

© Бирюков Н.А., 2024

УДК 629.7

Л.М. ГАЛИАХМЕТОВА
galiakhmetova.lian@yandex.ru
Науч. руководит. – канд. техн. наук, доцент А.В. ЗЫРЯНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ 3*D* ТЕХНОЛОГИЙ В АВИАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация: авиационная отрасль претерпела изменения с появлением 3D-печати. Инновационный метод производства, также известный как аддитивное производство, меняет то, как люди проектируют и изготавливают детали самолетов. 3D-печать обеспечивает беспрецедентную настройку и точность благодаря способности создавать сложные структуры традиционными методами, которые в прошлом были трудными или слишком дорогостоящими.
Ключевые слова: аддитивные технологии, топологическая оптимизация, прототипирование, аддитивное производство, 3D-печать.

Аддитивные технологии предполагают изготовление (построение) физического объекта (детали) методом послойного нанесения (от английского «*add*» – добавление) материала, в отличие от традиционных методов формирования детали, за счет удаления (от английского «*subtraction*» – вычитание) материала из массива заготовки.

В зависимости от конечного результата выделяют несколько направлений применения аддитивных технологий:

1.Изготовление деталей (*Rapid Patterns*), которые будут использоваться в качестве шаблонов для конечного изделия. Часто применяют в ювелирном деле.

2.Изготовление пресс-форм (*Rapid Tooling*) с помощью аддитивных методов. Потом их можно использовать для формовки и литья изделий.

3. Прямое цифровое производство (*Direct Digital Manufacturing*, *DD M*) – изготовление аддитивными способами конечного продукта.

Широко известные как 3*D*-печать и быстрое прототипирование, эти термины относятся к двум независимым процессам, которые являются подмножествами аддитивного производства.

Для создания изделия нужна компьютерная модель предмета и непосредственно его «выращивание» в оборудовании. Если углубиться, этапы можно расписать подробнее:

1.Создание программного эскиза, отражающего геометрию изделия – *CAD*-моделирование (*Computer Aided Design*).

2. Создание *STL*-файла. Этот формат поддерживает большинство установок для 3*D*-печати. Этап необходим для вычисления срезов и разделения модели на слои.

3. Настройка оборудования. Загрузка файла, при необходимости – коррекция форм, положения и т.д.

4. Непосредственно печать изделия по заданному технологией процессу. **Автоматизированный этап, в котором человек выступает наблюдателем.**

Существует семь различных категорий аддитивного производства, это:

1. Струйное распыление связующего
2. Направленное выделение энергии
3. Экструзия материалов
4. Струйная обработка материала
5. Сплавление в порошковом слое
6. Листовое ламинирование
7. Фотополимеризация в чане

Оптимизация топологии (ТО) – это метод оптимизации формы, который использует алгоритмические модели для оптимизации расположения материала в заданном пользователем пространстве для заданного набора нагрузок, условий и ограничений.

ТО максимизирует производительность и эффективность конструкции, удаляя лишний материал из областей, которые не должны нести значительные нагрузки, для снижения веса или решения проблем проектирования, таких как уменьшение резонанса или теплового напряжения.

Конструкции, созданные с оптимизацией топологии, часто включают в себя произвольные и сложные формы, которые сложно или невозможно изготовить традиционными методами производства. Однако конструкции ТО идеально подходят для процессов аддитивного производства, которые имеют более простые требования к проектированию и позволяют легко воспроизводить сложные формы без дополнительных затрат.

Программное обеспечение для топологической оптимизации не строит модель объекта с нуля. В него загружается геометрическая модель изделия, ранее изготовленного другим методом. Когда загрузили модель, мы отмечаем места, которые не подлежат изменению, например, крепления. Все остальное, что не попало в эти зоны, но принадлежит детали, является так называемой *design space*, то есть той зоной, где программа может менять геометрию. Затем мы в соответствии со служебным назначением изделия накладываются нагрузки, которые деталь должна выдерживать, то есть создается силовая схема нагрузок. И далее в соответствии с заданными параметрами программа начинает создавать новую оптимизированную геометрию. Между неизменными местами для крепления она выстраивает новую модель, а затем анализирует напряжение в каждом сечении – выдерживает его сечение или нет. Если не выдерживает, то программа меняет сечение.

Процесс построения новой модели довольно затратный по времени и требует больших вычислительных ресурсов. При этом программное

обеспечение умеет оптимизировать геометрию под разные виды производства: под литье, штамповку, ковку или под аддитивное производство.

Топологическая геометрия, как правило, имеет аморфные формы, в ней нет плоских, прямых линий, могут быть сплайны второго порядка. При соблюдении тех же самых свойств и нагрузочных характеристик такое моделирование позволяет уменьшить массу изделия, и, следовательно, сократить издержки на производство. Понижение массы изделия при сохранении функционала изделия – это задача номер один в самолетостроении, авиакосмической отрасли и автомобилестроении.

Передняя створка шасси самолета (рис. 1) – это важный элемент конструкции, обеспечивающий безопасность и эффективность работы воздушного судна. Одним из ключевых компонентов этой системы является кронштейн крепления створки, который играет решающую роль в надежности и функциональности шасси.

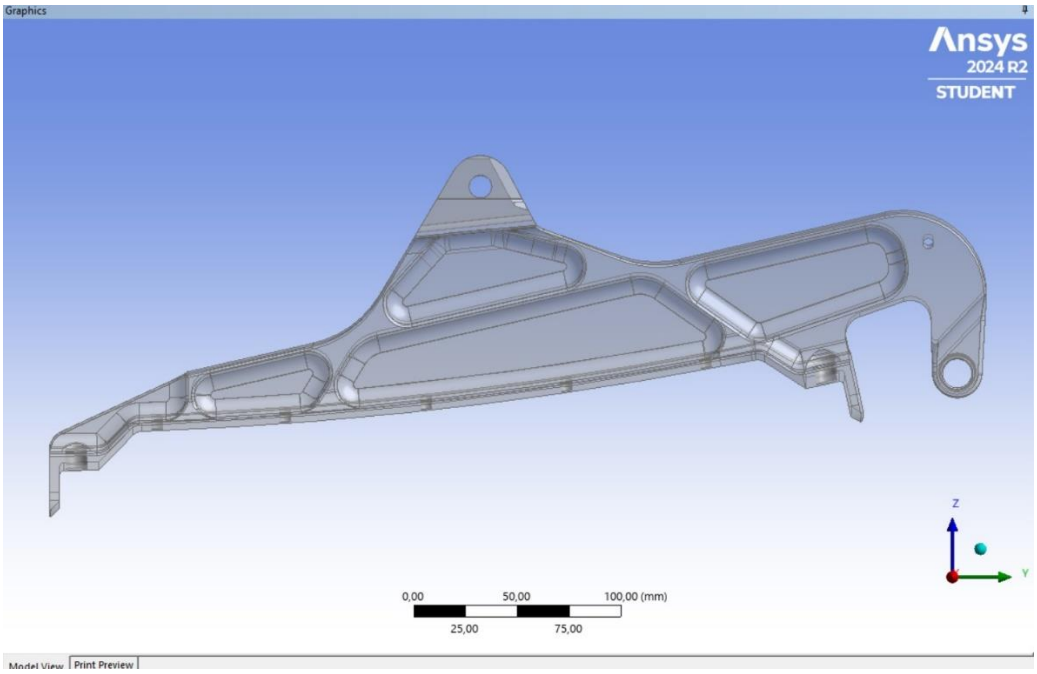


Рис. 1. Кронштейн крепления створок

Кронштейн крепления створки представляет собой металлическую деталь, предназначенную для соединения створки с основным шасси. Его основные функции включают:

1. Поддержка нагрузки: Кронштейн должен выдерживать значительные нагрузки, возникающие во время взлета, посадки и маневрирования самолета. Это требует от него высокой прочности и устойчивости к деформациям.

2. Обеспечение подвижности: Кронштейн должен позволять створке свободно открываться и закрываться, обеспечивая при этом необходимую жесткость конструкции.

3. Снижение вибраций: Во время полета самолет подвергается различным вибрациям, которые могут негативно сказаться на работе шасси. Кронштейн

должен минимизировать эти вибрации, защищая тем самым другие компоненты системы.

Кронштейны крепления створок шасси изготавливаются из высокопрочных легированных сталей или алюминиевых сплавов, что обеспечивает их легкость и прочность. Современные технологии производства, такие как 3D-печать и лазерная резка, позволяют создавать детали с высокой точностью и минимальными отходами.

Топологической оптимизации данной детали будет проводится в программе *ANSYS.*

Топологическая оптимизация в *ANSYS* позволяет с помощью модели конечных элементов (МКЭ)-расчётов снижать массу и улучшать жёсткостные характеристики конструкций.

Процесс топологической оптимизации в *ANSYS* включает несколько этапов:

1. Постановка и решение прочностной задачи. Для этого задаётся контурная геометрическая область конструкции, её механические свойства, условия закрепления и действующие нагрузки. Геометрия модели может быть импортирована из основных *CAD*-систем.

2. Формулировка целевой функции. Это может быть снижение податливости конструкции, увеличение собственных частот, ограничение по деформациям или иная цель.

3. Описание пространства проектирования. Определяется область конструкции, топология которой может меняться, и область, для которой изменения запрещены.

4. Задание всех необходимых настроек алгоритма оптимизации. Остаётся указать желаемый процент снижения материалоёмкости и запустить расчёт.

5. Экспорт полученной топологии в формате *STL*. По итогам расчёта *ANSYS Mechanical* позволяет экспортировать полученную топологию в этом формате.

6. Выполнение поверочного расчёта. После создания КЭ-модели с новой топологией поверочный расчёт в *ANSYS Mechanical* позволит быть уверенным в работоспособности облегчённой конструкции.

В результате выполненной оптимизации удается достичь потери веса на более чем 20% без потери прочностных характеристик.

Имеются ряд преимуществ и недостатков изготовлении данного Кронштейна аддитивным методом.

Преимущества традиционных методов:

1. Доказанная надежность: Традиционные методы имеют долгую историю применения в авиационной промышленности и хорошо зарекомендовали себя.

2. Широкий выбор материалов: Возможность использования различных металлов и сплавов, таких как алюминий, титан и сталь.

3. Высокая прочность готовых изделий: Процесс обработки может обеспечить отличные механические свойства.

Недостатки традиционных методов:

1. Сложность изготовления: Для создания сложных форм может потребоваться значительное количество времени и ресурсов.

2. Отходы материала: Процесс удаления материала приводит к образованию отходов, что увеличивает затраты

3. Длительное время производства: Подготовка инструмента и сам процесс

4. Обработка занимает много времени.

Аддитивные технологии

Преимущества аддитивных технологий:

1. Гибкость дизайна: Возможность создания сложных и оптимизированных форм, которые невозможно или трудно реализовать традиционными методами.

2. Снижение отходов: Аддитивные технологии используют только необходимое количество материала, что снижает уровень отходов.

3. Ускорение прототипирования: Быстрое создание прототипов позволяет быстрее тестировать и улучшать конструкции.

4. Легкость и прочность: Возможность оптимизации структуры детали для достижения наилучших механических свойств при минимальном весе.

Недостатки аддитивных технологий:

1. Ограничения по материалам: Не все материалы подходят для аддитивного производства, что может ограничить выбор.

2. Проблемы с качеством поверхности: Некоторые технологии могут требовать дополнительной обработки для достижения нужного качества поверхности.

3. Скорость производства: Хотя аддитивные технологии могут ускорить прототипирование, массовое производство может занять больше времени по сравнению с традиционными методами.

С учетом всех вышеперечисленных факторов, аддитивное производство представляет собой более современный и эффективный подход к изготовлению кронштейна крепления передней створки шасси самолета. Гибкость в дизайне, снижение отходов, ускорение прототипирования и возможность использования специализированных материалов делают аддитивные технологии привлекательными для авиационной промышленности. Переход на аддитивное производство может не только повысить качество и надежность компонентов, но и снизить затраты и время на их разработку и производство. В дальнейшем в работе будет выполняться прочностной расчёт оптимизированной конструкции с определением всех действующих нагрузок и печать аддитивным методом получившегося образца.

Библиографический список

1. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники / В.И. Кулик, А.С. Нилов, Санкт-Петербург, 2018.

2. Анализ конструкции и лётной эксплуатации функциональных систем самолета Ту-214 / Корнеев В.М. 2020.

3. Аддитивные технологии в отечественном авиастроении: текущие позиции и направления развития / М.В. Тилинин, Б.М. Прибытков. 2019.

4. Топологическая оптимизация детали *https://www.mdpi.com/1996-1944/16/11/4061*

5. Аддитивное производство в аэрокосмической промышленности: *https://www.thomasnet.com/insights/additive-manufacturing-aerospace*

© Галиахметова Л.М., 2024

УДК 629.7

Э.М. Галиева
galiyeva.elvina@mail.ru
Науч. руководв. – док. техн. наук, проф. И.Х. Бадамшин

Уфимский университет науки и технологий

ОЦЕНКА РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВИАЦИОННЫХ ГТД И СПОСОБЫ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ

Аннотация: опыт доводки и эксплуатации авиационных ГТД показывает, что недостаточная надежность трубопроводных систем может приводить к отказам, значительно влияющим на безопасность работы АД. Так возникла необходимость решения ряда вопросов, связанных с прочностью и герметичностью трубопроводов. Учитывая условия и особенности работы тонкостенных трубопроводов ставится цель оптимизации конструкции соединения трубопроводов, конструкции промежуточных опор и конфигурации самих трубопроводов.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; трубопроводы; ресурс; статическое и термоциклическое нагружение; гофрированные трубопроводы.

Актуальность

Опыт доводки и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) показывает, что недостаточная надежность трубопроводных систем может приводить к отказам, значительно влияющим на безопасность работы авиационного двигателя (АД). Так возникла необходимость решения ряда вопросов, связанных с прочностью и герметичностью трубопроводов. Учитывая условия и особенности работы тонкостенных трубопроводов ставится цель оптимизации конструкции соединения трубопроводов, конструкции промежуточных опор и конфигурации самих трубопроводов. Так, возникает актуальная задача расчетной оценки ресурса нескольких

конструктивно-схемных решений трубопроводов функциональных систем ГТД с учетом статических, термических и циклических нагрузок.

Гибкие металлические трубопроводы (ГМТ) имеют хорошее сопротивление температурным напряжениям и внутреннему давлению. Благодаря податливой конструкции они имеют больший ресурс по сравнению с гладкими трубопроводами и менее подвержены коррозии.

Однако, несмотря на преимущества, ГМТ, как и любая другая конструкция, подвержены усталостному разрушению и требуют периодического контроля.

Работы в области инспекции ведутся в нескольких направлениях:

определение степени влияния нагруженно-деформированного состояния (НДС) на циклическую прочность трубопроводов при динамических нагрузках;

разработка методов определения уровня напряжений в трубопроводах;

анализ влияния различных дефектов монтажа на циклическую прочность трубопроводных систем;

разработка мероприятий по снижению уровня НДС.

Расчетная модель и допущения

Оценка остаточного числа циклов до предельного состояния является актуальной задачей в области организации безопасности полетов и технической эксплуатации авиационной техники (АТ).

Оценка параметров, определяющих техническое состояние эксплуатируемого объекта, осуществляется путем анализа технической документации и обследования конструкций.

На приведенные параметры влияют такие факторы, как изменение свойств материала, условия нагружения, изменение конструктивных решений и т.д. Эти характеристики определяют начальный уровень надежности, при относительно однородных условиях эксплуатации снижение остаточного ресурса происходит постепенно. В этом случае оценка остаточного числа циклов производится при проверке фактического состояния АТ.

Так, существует ряд методик оценки остаточного ресурса; каждая из них относится к одной из двух моделей – логико-вероятностной, детерминированной.

К первой модели относятся методики расчета ресурса:

по срокам эксплуатации объектов-аналогов;

по изменению вероятности отказа объекта.

К детерминированной модели относят:

по изменению параметров состояния;

по нормативам сроков эксплуатации до капитального ремонта конструкции;

определение коэффициента запаса по видам предельных состояний.

Различие этих моделей ведет к разному уровню результатов оценки состояния конструкций. По сравнению с детерминированной, логико-вероятностная модель позволяет получить более точные результаты, так как она использует теорию вероятности, учитывающую временные характеристики

случайных величин. В то время как детерминированная – определённые уровни распределения. В следствии чего, все параметры представляются только средними значениями и средними отклонениями.

Однако, логико-вероятностная гораздо сложнее в своем исполнении и требует большего количества информации о воздействующих нагрузках на рассматриваемую деталь и о используемых материалах [3].

Так, последовательность расчета числа циклов до предельного состояния будет иметь вид:

Определение напряженно-деформированного состояния в соответствии с моделью нагружения (НДС):

расчет напряжений от внутреннего давления [1]:

расчет напряжений от массы трубопровода и рабочего тела путем вычисления изгибающих моментов, и поперечных сил (рис. 1- 2) [5]:

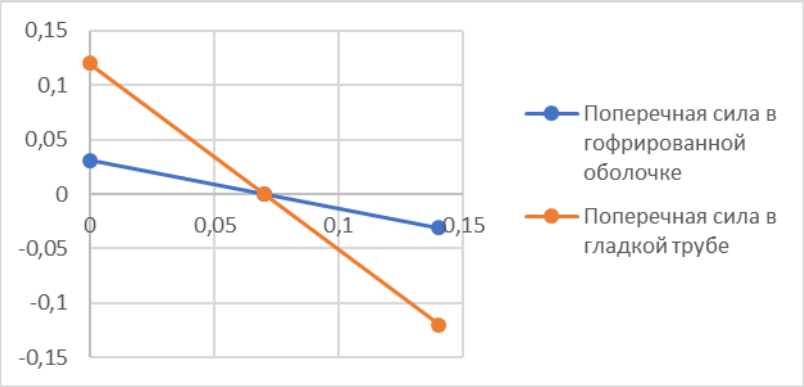


Рис. 1. Эпюра изменения поперечной силы на длине трубопровода

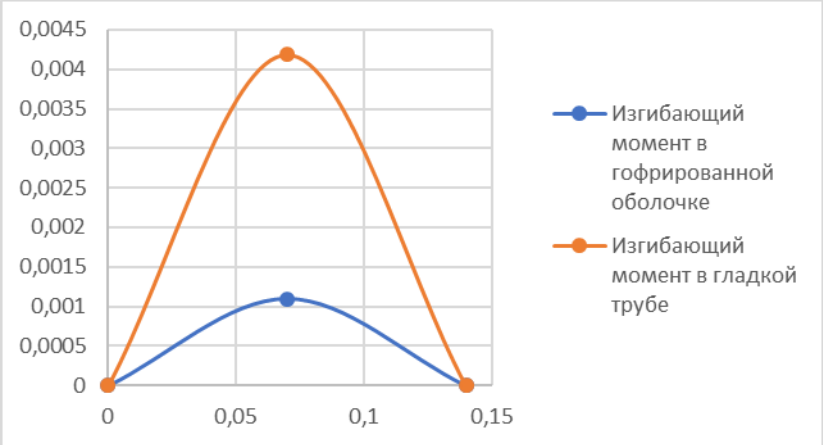


Рис. 2. Эпюра изменения изгибающих моментов на длине трубопровода

- расчет температурных напряжений;
- расчет монтажных напряжений [6];
- расчет напряжений от колебаний.

Определение модели разрушения в соответствии с моделью нагружения;

Определение запасов прочности по предельным напряжения и по числу циклов до предельного состояния.

Анализ (таблица 1) двух расчетов дает понять, что гофрированная оболочка хорошо гасит вибрации и имеет более длительный жизненный цикл по сравнению с гладкими трубопроводами.

Таблица 1

Сравнительная таблица к анализу расчетов

Рассчитанные параметры	Гладкий трубопровод	Гофрированный трубопровод (без учета оплетки)
СТАТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ		
Эквивалентные напряжения от внутреннего давления, МПа	9,1	55
Напряжения от изгибающего момента от массы трубопровода и рабочего тела, МПа	0,006	0,0018
ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ		
Напряжения от вибрационных нагрузок, МПа	150	23
Суммарные напряжения, МПа	159,2	78,1
Число циклов до разрушения, $N_f * 10^{10}$	2,639	22,35

Способы повышения ресурса конструкции функциональной системы

Исходя из выражения запаса прочности по пределу выносливости, можно выделить три направления конструктивно-технологических мер, повышающих прочность и надежность трубопроводных систем:

– необходимо совершенствовать способы повышения предела выносливости трубопроводов;

– снижать статические нагрузки, действующие на трубопроводы;

– снижать переменные нагрузки, действующие на трубопроводы.

Так, с целью уменьшения влияния динамических нагрузок и вибраций используют такие методы, как: частотная отстройка путем демпфирования трубопроводных опор металлорезиновыми опорами, путем использования гофрированных трубопроводов, фторопластовых рукавов и т.д.

Наибольшее распространение получили гофрированные металлические трубы и металлорезиновые опоры. И так как основным преимуществом ГМТ – является то, что они хорошо воспринимают вибрационные нагрузки, для усиления и повышения устойчивости трубопроводов к высоким температурам и давлениям используют металлическую оплетку.

Дефектация и ремонт трубопроводов

При анализе повреждений трубопроводов на летательных аппаратах было выявлено, что, в основном, их разрушение несет усталостный характер и они

происходят при значительных вибрационных напряжениях. Так как циклическая прочность зависит от напряженно-деформированного состояния (НДС), изменение конфигурации и поперечного сечения трубопроводов приводит к изменению величины напряжений в широком диапазоне.

Следует отметить, что усталостному разрушению трубопроводов также способствуют концентраторы напряжений:

– механические повреждения (следы от режущего инструмента, риски, царапины, забоины);

– резкие переходы с изменением жесткости (переход от трубы к ниппелю, от одного диаметра к другому в ниппеле и т.д.).

– В настоящее время разработаны методики и соответствующие приборы для контроля фактического состояния.

– Так, большинство авиационно-технических баз на сегодняшний день используют такие приборы диагностики, как:

– многоканальные модульные акустические системы;

– вихретоковые дефектоскопы и толщиномеры;

– магнитные дефектоскопы (порошковые и переносные) [4].

По сравнению со штатными средствами контроля предлагаемый лазерный экстензометр, регистрирующий колебания и деформации трубопроводов, является более точным и практичным.

При использовании лазерного экстензометра нет необходимости наносить метки на контролируемые изделия, что значительно экономит время контроля. Лазерные экстензометры также можно использовать для диагностики при повышенных или отрицательных температурах.

Библиографический список

1. Старцев Н.И. Трубопроводы газотурбинных двигателей: монография/ Н.И. Старцев. – Москва: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 1976. – 272 с.

2. Головина Н.Я., Кривошеева, С. Я. Исследование состояния гибких металлических трубопроводов ГТД при вибрационном нагружении: монография / Н.Я. Головина, С.Я. Кривошеева. – Москва: Издательство «Интернаука», 2017. – 106 с.

3. Волков М.Д. Существующие модели оценки остаточного ресурса конструкций и их сравнительный анализ / М.Д. Волков, А.В. Кибкало. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 25 (129). – с. 24–26.

4. Киселёв Д.Ю, Макаровский И.М. Неразрушающие методы контроля технического состояния воздушных судов: учебное пособие/ Киселёв Д.Ю, Макаровский И.М. – Самара: Издательство Самарского университета, 2017. – 128 с.

5. Сапожников В.М., Лагосюк Г.С. Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолетов и вертолетов: учебное пособие/ Сапожников В.М., Лагосюк Г.С. – Москва: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 1973. – 248 с.

6. Крюков А.И., Глинкин И.М., Фионин В.И. Гибкие металлические рукава: монография / Крюков А.И., Глинкин И.М., Фионин В.И. – Москва: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 1970. – 203 с.

© Галиева Э.М., 2024

УДК 629.7

А.В. ЕСИНА
lina.yesina.02@mail.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент А.И. ЖУК

Уфимский университет науки и технологий

УСТАНОВКА КРЫЛА НА ВЕРТОЛЕТ МИ-26

Аннотация: установка крыла на Ми-26 является одним из наиболее ответственных процессов при техническом обслуживании данного вертолета. Крыло – это не только элемент конструкции, обеспечивающий подъемную силу воздушного судна, но и содержит в себе множество важных систем и узлов, отвечающих за безопасность полетов.
Ключевые слова: вертолет, модернизация, установка, крыло, конструкция, аэродинамика.

Современная авиационная индустрия предъявляет непрерывные требования к разработке и совершенствованию самолетов и вертолетов. Особое внимание уделяется не только созданию новых моделей, но и модернизации уже существующих воздушных средств. В данной научной работе особенно важным является процесс установки и обслуживания крыла - одной из наиболее значимых частей воздушного судна.

Вертолёт Ми-26 (рисунок 1) построен по классической схеме с восьмилопастным несущим винтом и пятилопастным рулевым винтом, трёхстоечным неубирающимся шасси. Силовая установка вертолёта включает два турбовальных двигателя Д-136, и вспомогательную силовую установку ТА-8. Конструкция вертолёта выполнена из алюминиево-литиевых сплавов с широким применением титановых сплавов и композиционных материалов.

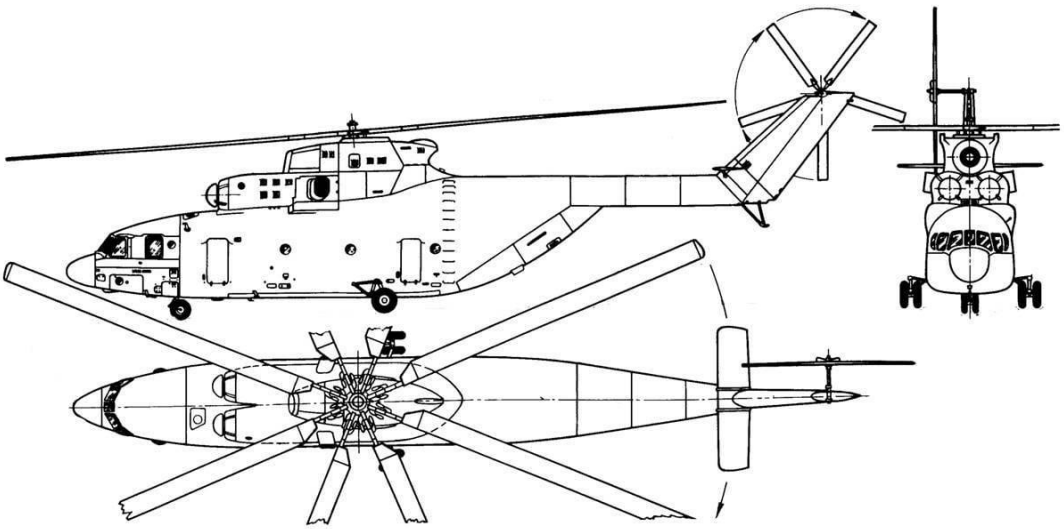


Рис. 1. Схема вертолета Ми-26

Крыло представляет собой балку, на которую действует распределенные и сосредоточенные силы. Каркас крыла состоит из продольных и поперечных наборов набора и обшивки. К продольным наборам относятся лонжероны, продольные стенки и стрингеры.

Сочетание крыла и шасси позволяет вертолету взлетать как самолету. Это позволяет экономить горючее. Крайне полезная функция для тяжелого вертолета. Особенно при условии того, что большинство подобных аппаратов и так базируется на военных аэродромах. Впрочем, это далеко не единственная функция вертолетных крыльев.

Наличие крыла актуально для транспортных вертолетов, особенно тех, что должны переносить грузы на внешней подвеске. Крыло на таких аппаратах позволяет снизить нагрузку на вращающиеся лопасти, и добиться положительной интерференции вращающегося ротора. Т.е. благодаря крылу улучшается управляемость и устойчивость летательного аппарата в воздухе, особенно при наличии серьезной нагрузки на борту или подвеске. Это в свою очередь приводит к экономии топлива. В среднем наличие крыла позволяет грузовому вертолету экономить от 7 до 30% затрачиваемого на полет топлива.
Крыло может быть смонтировано на винтовом аппарате вертикального взлёта и посадки (АВВП) для выполнения ряда задач, включая:

- разгрузку несущего винта (НВ), что способствует увеличению скорости горизонтального полёта вертолёта; одновременно крыло может выполнять функции лафета для установки специального оборудования, крепления стоек шасси и размещения топливных баков;
- крепление НВ на вертолете поперечной схемы и его разгрузка и горизонтальном полете, крепление стоек шасси и размещение баков с топливом;
- крепление НВ на преобразуемом АВВП поперечной схемы с поворотными винтами и создание подъемной силы в горизонтальном полете.

В зависимости от назначения крыла изменяются как величина, так и характер нагрузки на его силовые элементы, а также требования к конструкции. С увеличением скорости полета винтового АВВП возрастают требования к аэродинамике, устойчивости, управляемости и аэроупругости, что в свою очередь влияет на аэродинамическую компоновку крыла, уровень его механизации и жесткость конструкции.

Аэродинамические требования предполагают минимизацию взаимовлияния несущего винта и крыла в режиме висения, а также достижение максимального аэродинамического качества во время крейсерского полета.

Жесткость крыла на кручение и изгиб должна быть достаточной для предотвращения недопустимых значений показателей статической и динамической аэроупругости.

Еще одним важным параметром для установки крыла является поперечный угол (ψ) (рисунок 2) – угол, заключенный между поперечной осью вертолета и нижней поверхностью крыла. Угол поперечного крыла может быть положительным или отрицательным. Положительный поперечный угол улучшает поперечную устойчивость вертолета и создает большую безопасность при посадке.

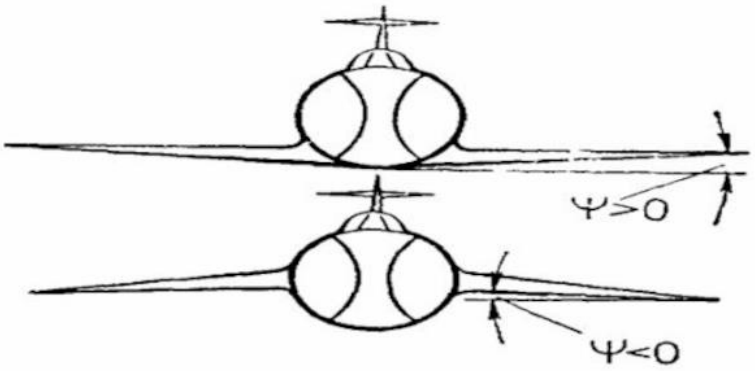


Рис. 2. Поперечный угол крыла (ψ)

С целью улучшения летных характеристик летательного аппарата на крыльях применяется геометрическая (рисунок 3) и аэродинамическая крутки (рисунок 4). Геометрическая крутка – изменение угла установки профилей вдоль размаха крыла. Аэродинамически закрученное крыло – крыло, которое набрано из различных профилей по толщине, кривизне и по типу.

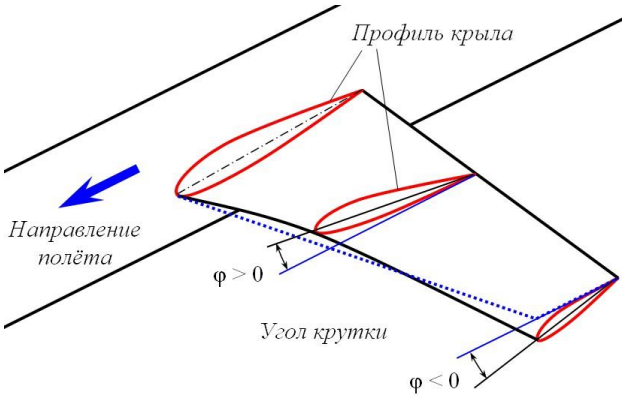


Рис. 3. Геометрическая крутка крыла

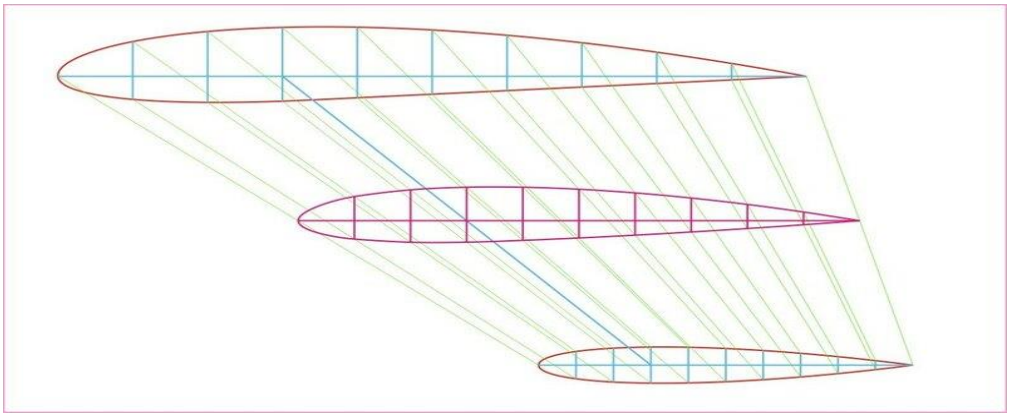


Рис. 4. Аэродинамическая крутка крыла

Угол между хордой крыла и набегающим на него потока называется углом атаки α (рисунок 5).

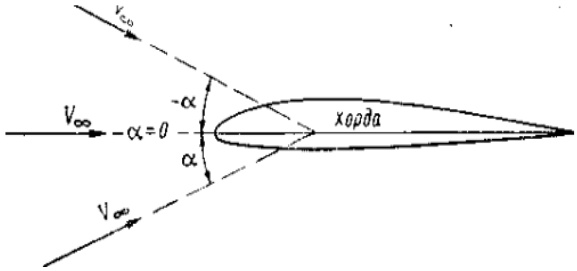


Рис. 5. Угол атаки профиля

Угол атаки считается положительным, если поток набегает на нижнюю поверхность крыла.

При работе на осевом режиме обтекания НВ и на малых скоростях полета вертолета крыло находится в струе от НВ, т.е. обтекается индуктивным потоком под углом атаки близким к $\alpha=-90^{\circ}$. На крыле при этом возникает сила сопротивления, представляющая собой отрицательную подъемную силу.

Таким образом, на режимах осевого обтекания и близкого к нему крыло уменьшает тягу НВ и является лишним в компоновке вертолета.

По мере увеличения поступательной скорости полета вертолета крыло выходит из струи НВ и при некотором значении скорости угол атаки крыла, а вследствие этого и его подъемная сила становится положительными.

Результатом научно-исследовательской работы является предложение улучшения летно-технических характеристик вертолета Ми-26, путем изменения конструкции, а именно установкой дополнительного оперения.

Несмотря на то, что крыло увеличивает аэродинамическое сопротивление и вес конструкции, установка крыла на Ми-26 повысит эффективность полета, снизит нагрузку на несущий винт, увеличит дальность, повысит максимальную скорость ЛА, и снизит расход во время крейсерского полета, а также крыло может послужить для подвесов каких-либо агрегатов.

Библиографический список

1. Дудник В.В., Конструкция вертолетов. – Ростов н/Д: Издательский дом ИУИ АП, 2005. – 158 с.

2. Далин В.Н., Михеев С.В. Конструкция вертолетов: Учебник. – М.: Изд-во МАИ, 2001, – 352 с.

3. Яцунович М.С., Практическая аэродинамика вертолета Ми-6: Учебник.- Москва: Издательский дом “Транспорт”, 1969. – 203 с. Современные авиационные конструкционные сплавы: Учеб. пособие / В.Н. Климов, Д.М. Козлов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 40 с.

4. Корнеев В.М. Конструкция и основы эксплуатации летательных аппаратов: конспект лекций / В.М. Корнеев. – Ульяновск: УВАУ ГА(и), 2009 – 130 с.

© Есина А.В., 2024

УДК 629.7

А.М. САЛАВАТОВА
asaliya2019@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Б.Р. АБДУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

ВТУЛКА РУЛЕВОГО ВИНТА ТИПА ФЕНЕСТРОН

Аннотация: в настоящее время выросло количество строящихся и проектируемых одновинтовых вертолетов, в которых в качестве замены классическому рулевому винту используется фенестрон совместно с килем. Это вызвано стремлением преодолеть эксплуатационные недостатки рулевого винта.
Ключевые слова: фенестрон, рулевой винт, вертолет, одновинтовая схема.

Одной из самых первых проблем, с которыми столкнулись конструкторы при создании вертолёта, была проблема реактивного момента несущего винта от аэродинамических сил сопротивления вращению его лопастей. По третьему закону Ньютона требуется, чтобы для каждого действия существовало равное и противоположное действие. При вращении несущего винта вертолёта возникает сила тяги за счёт того, что лопасти направляют поток воздуха вниз, как бы отталкиваясь от него, кроме того, на них действует сила сопротивления воздуха, что создает крутящий момент, который стремится повернуть корпус вертолета в противоположную сторону. Чтобы противодействовать реактивному моменту несущего винта, у одновинтового вертолёта используется рулевой винт, расположенный на хвостовой балке, который помимо этого служит органом управления по курсу.

В настоящее время существуют следующие виды рулевых винтов: рулевой винт классической схемы, фенестрон (рулевой винт, расположенный в кольцевом канале), *NOTAR* (*no tail rotor* – без рулевого винта) (вертолёты со струйной системой управления) [2].

В классической схеме винт небольшого диаметра располагается на хвостовой балке вертолёта на некотором расстоянии от оси несущего винта (рис. 1).

В списке современных представителей – ударный Ми-28Н, многоцелевые «Ансат» и Ми-38, Ми-8АМТ, Ми-171А3, тяжёлый транспортный Ми-26, среди зарубежных – это *AH*-64 *Apache*, *UH*-60 *Black Hawk* или лёгкий коммерческий *Robinson R22* и др. [3].

Достоинствами классической схемы рулевого винта являются относительная простота конструкции и управления.

Однако есть и недостатки: винт данной схемы является источником звуковых колебаний, частота которых выше, чем у несущего винта, а человеческое ухо к ним более восприимчиво; на высоких скоростях рулевой винт создает значительное вредное сопротивление; незакрытые лопасти могут оказаться повреждёнными во время посадки на неподготовленные площадки или снежную целину; погрузка и выгрузка пассажиров рядом с работающими винтами представляет немалую опасность для жизни людей; вредная поперечная сила, создаваемая килем, может достигать 10–15 % тяги рулевого винта; затраты мощности на привод винта составляют 8–15 % от суммарной мощности силовой установки. В результате влияния вертикального оперения растут затраты мощности, необходимые для обеспечения путевой балансировки вертолета.

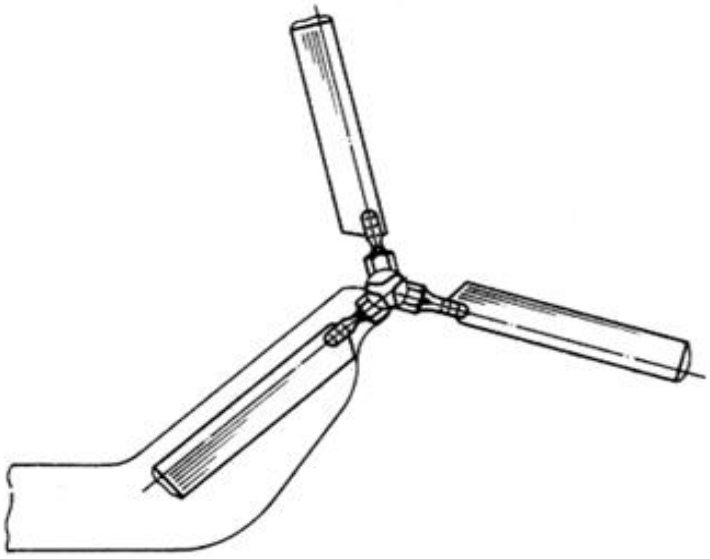


Рис. 1. Рулевой винт классической схемы

Вариацией рулевого винта является «фенестрон» (рис. 2) – закрытый рулевой винт вертолёта, устанавливаемый в специальный профилированный канал, встроенный в киль вертолета. Конструктивно фенестрон состоит из направляющих аппаратов, многолопастного ротора небольшого размера и

корпуса с цилиндрическим каналом, в котором устанавливается винт. Принципы действия классического рулевого винта и фенестрона аналогичны. Отличия заключаются в первую очередь в количестве лопастей, если у обычного винта от двух до пяти лопастей, то у фенестрона – от восьми до восемнадцати.

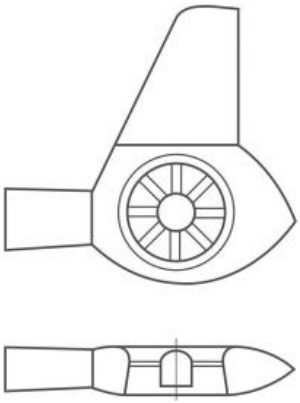


Рис. 2. Общий вид рулевого винта вертолета типа фенестрон

У фенестрона лопасти имеют гораздо меньший диаметр и, соответственно, вращаются с более высокой частотой. Кроме того, привод поворота лопаток размещается в специальном корпусе, который является частью вертикального киля вертолета.

Впервые фенестрон был использован на вертолете *SA* 340. На сегодняшний день данная схема установлена на вертолетах Ка-62*, Airbus H*135*, Airbus H*145*, Boeing/Sikorsky RAH*-66 *Comanche, Eurocopter EC*130.

Расположенный в кольце рулевой винт обеспечивает безопасность на висении у земли для работ обслуживающего персонала, особенно в условиях плохой видимости (ночью, в туман, дождь, снег); отсутствие вибраций во всем диапазоне высот и скоростей полета; КПД фенестрона значительно выше, чем КПД традиционного рулевого винта, а габариты меньше; в горизонтальном полете без скольжения фенестрон работает практически в условиях работы на месте, и значительная доля боковой силы создается профилированной входной частью кольцевого туннеля; в горизонтальном полете фенестрон значительно разгружается и потребляет меньшую мощность, чем традиционный рулевой винт (выигрыш – около 2% полной мощности). Основное преимущество «винта в кольце» – уменьшение турбулентности и срыва вихрей, которые происходят на лопастях винта [1].

Недостатками являются: больший вес, чем у классического винта, большая потребная мощность на привод на висении (до 25% от суммарной мощности силовой установки) и повышенное сопротивление воздуха, создаваемое корпусом; значительное увеличение толщины и массы киля, делающей установку фенестрона на тяжёлые вертолёты нецелесообразной; высокочастотный шум; более высокая стоимость.

На рис. 3 приведено сравнение потребных мощностей для фенестрона и обычного рулевого винта в зависимости от скорости горизонтального полета. Как видно, на скоростях свыше 150 км/ч мощность, идущая на фенестрон,

более чем в два раза меньше мощности обычного рулевого винта. Так, на скорости 250 км/ч этот выигрыш составляет 70% или 3,6 от полной мощности.

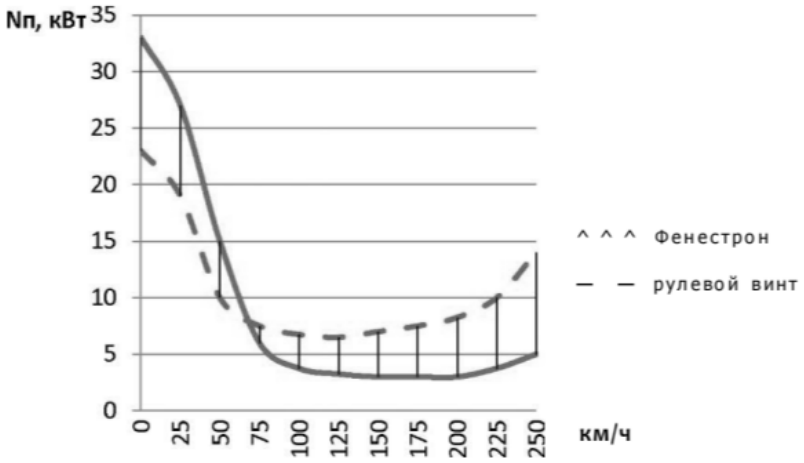


Рис. 3. График сравнения потребных мощностей

NOTAR – система компенсации реактивного момента от несущего винта и управления вертолётом по курсу, применяемая вместо рулевого винта (рис. 4). Состоит из вентилятора, установленного в задней части фюзеляжа, и системы воздушных сопел на хвостовой балке. Сопла в корневой части балки воздействуют на пограничный слой, вследствие чего возникает эффект Коанда– поток воздуха от несущего винта изменяет своё направление, отклоняясь в сторону; этим компенсируется реактивный момент. В конце балки установлено управляемое реактивное воздушное сопло, применяемое для непосредственного управления по курсу [5].



Рис. 4. Система *NOTAR*

В Советском Союзе эксперименты проводились на вертолёте Ка-26-СС. Существует три модели серийных вертолётов, использующих систему *NOTAR*, все они производятся американской компанией «*MD Helicopters*» (*MD* 520*N*, *MD* 600*N*, *MD* 900 *Explorer*).

Достоинства этой системы: повышенный уровень безопасности из-за отсутствия рулевого винта; значительное снижение уровня шума.

Из недостатков можно выделить боязнь пыли, так как в случае её попадания подвижные части соплового аппарата могут заедать.

В результате анализа рассмотренных схем, для проектируемого вертолёта в качестве рулевого винта был выбран фенестрон.

В работе рассмотрена втулка фенестрона для проектируемого вертолёта.

Деталь втулка входит в состав узла «рулевой винт». Она предназначена для обеспечения сборки фенестрона и устанавливается на центральной тяге.

Деталь выполнена из легированной, конструкционной стали 30ХГСА. Выбор материала обусловлен тем, что при заданных прочностных характеристиках и габаритах сталь имеет преимущества перед алюминиевыми сплавами (большая прочность) и титановыми сплавами (меньшая себестоимость изготовления).

Втулка имеет сквозное отверстие с нарезанной внутренней резьбой для установки на тягу и восприятия от неё перемещения. Для предотвращения коррозии, деталь имеет защитное гальванопокрытие. Температурный режим эксплуатации равен температуре окружающей среды (± 50 °С).

Разработан технический процесс изготовления втулки фенестрона для проектируемого вертолета.

Библиографический список

1. Шайдаков, В.И. Аэродинамика винта в кольце. – Москва: Изд-во МАИ, 1996. – 88 с.

2. Володко, А.М. Вертолеты / А.М. Володко, М.П. Верхозин, В.А. Горшков. – Москва: Воениздат, 1992. – 557 с.: ил.

3. *Helicopter Tail Rotors* / [Электронный ресурс] // *Helo aero* – *URL*: *https://www.copters.com/mech/tail_rotors.html*.

4. Схемы вертолетов. / [Электронный ресурс] // Википедия – *URL*: *http://ru/wikipedia/org/wiki*/Схемы_вертолетов.

© Салаватова А.М., 2024

УДК 629.7

Ю.Г. ХИСАМИТДИНОВА
kiimmea@bk.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.И. ЖУК

Уфимский университет науки и технологий

СПОСОБ СБОРКИ ФЮЗЕЛЯЖА

Аннотация. Число авиационных пассажирских перевозок постоянно растет, что обуславливает потребность создания новых самолетов. Растет и сложность изделий авиационной техники, что приводит к повышению объема информации, которая используется в процессах проектирования, изготовления, обслуживания и эксплуатации этой техники.
Ключевые слова: фюзеляж, шпангоуты, оправка.

Перед проектировщиком воздушного судна стоят наукоемкие задачи, решение которых требует более скорого внедрения новых информационных технологий на стадии проектирования. На ряду с изменениями задач, решаемых при проектировании, возникают задачи при определенных технологий производства, которые направлены на снижении трудоемкости, улучшения качества.

Одним из основных направлений является обеспечение производства, создание новых конструкций, которые в процессе изготовления летательного аппарата (ЛА) позволяет повысить эффективность, уменьшить время на подготовку.

Фюзеляж – это основная часть самолета, которая служит для размещения экипажа, пассажиров и грузов. Он представляет собой длинный и обтекаемый корпус, который соединяет все основные элементы самолета, такие как крылья, хвостовое оперение и двигатели.

Существует 2 типа конструкции фюзеляжа (рис. 1):

- Ферменные. Силовой каркас которых представляет собой пространственную ферму. В настоящее время эта конструкция применяется редко, ввиду большого веса и технологической сложности;
- Балочные. Силовая схема представляет собой тонкостенную балку, состоит из продольного и поперечного набора, а также обшивки. Балочный тип конструкций фюзеляжа является более целесообразным в использовании для современных летательных аппаратов из-за обеспечения равномерного распределения нагрузок по всей длине фюзеляжа, за счет использования лонжеронов и шпангоутов.

Характер и степень нагружения основных силовых элементов зависит от конструктивно-силовой схемы фюзеляжа (КСС). Существуют 3 типа КСС:

1. Стрингерный. Конструкция, состоящая из обшивки, работающая при изгибе и кручении фюзеляжа и часто расположенных стрингеров и шпангоутов

2. Лонжеронная. Конструкция, состоящая из мощных лонжеронов и слабого набора стрингеров и шпангоутов с обшивкой, работающей на сдвиг от поперечных сил и крутящего момента.

3. Обшивочный (монокок). Конструкция, представляющая собой сравнительно толстую или многослойную обшивку, подкрепленная только шпангоутами. В этой конструкции нагрузку воспринимает обшивка.

К продольному набору относятся – лонжероны и стрингеры, к поперечному набору относят шпангоуты.

– лонжероны – продольный элемент конструкции, расположенный вдоль фюзеляжа и обеспечивающий его прочность и жесткость, и воспринимающий большие нагрузки, во время полета, на себя.

– стрингеры – это длинные и вертикальные элементы, расположенные вдоль лонжеронов, они служат для укрепления лонжеронов и придают дополнительную жесткость, и так же помогают распределить нагрузки. Как и лонжероны, стрингеры принимают на себя часть нагрузок, а именно возникающие от аэродинамического давления при полете.

– шпангоуты – поперечный элементы набора. Их делят на нормальные и усиленные.

1. Нормальные. Такие шпангоуты служат для придания формы фюзеляжа, подкрепляют обшивку, но не рассчитаны на значительные нагрузки. Выполняются из гнутых дюралюминиевых профилей, согнутых по форме сечения фюзеляжа, состоящая из нескольких частей.

2. Усиленные. Служат для придания формы фюзеляжа и подкрепления обшивки, а также воспринимают местные нагрузки. Устанавливаются в местах, подверженных особо высоким нагрузкам, такие как разъемы фюзеляжей, в местах крепления крыльев, оперения и др. агрегатов.

– Обшивка – лист, выполненный из дюралюминия или титана, который покрывает каркас элементов. Служит для обеспечения аэродинамического обтекания и для восприятия крутящих моментов. В местах вырезов обшивки фюзеляжа резко снижается прочность конструкции и для его сохранения подкрепляют усиленными шпангоутами.

Создание фюзеляжа летательного аппарата – это сложный и многоэтапный процесс, который включает в себя множество этапов и операций который направлен на формирование и создание прочной и аэродинамически – эффективной конструкции. Процесс сборки может отличаться в зависимости от типа самолета (пассажирский, грузовой, военный) и используемых технологий (традиционные материалы или композитные материалы).

Сборка фюзеляжа осуществляется в несколько этапов:

Структурная сборка. Каждый отсек фюзеляжа собирается на отдельных стапелях и формируется из отдельных частей. Обшивка изготавливается чаще всего из легкого и прочного дюралюминия. При сборке сварка практически не применяется: листы обшивки соединяются с помощью заклепок.

– Комплектация. Собранные секции фюзеляжа размещают в сборочном цеху, где устанавливают внутренние системы – электропроводку, кондиционеры, освещение, тепло- и звукоизоляцию, а также электронные компоненты.

– Финальная сборка. В этом же цеху, производят окончательную сборку, на этой стадии собираются все части фюзеляжа (центральные, носовые и хвостовые отсеки) в единое целое, затем уже к фюзеляжу прикрепляют крыло, хвостовое оперение и шасси. Стоит отметить, что отдельные части, узлы и агрегаты летательного аппарата могут производиться на разных заводах и даже в разных странах.

– Покраска. Уже почти готовый лайнер отправляется в покрасочный бокс – специальный ангар, в котором работают системы очистки и вентиляции воздуха, поддерживаются фиксированная температура и влажность. Перед покраской иллюминаторы, шасси, все отверстия и выступающие детали изолируют с помощью плёнки и бумаги, а потом фюзеляж красят вручную – полиуретановую краску пульверизаторами распыляют по поверхности.

– Отделка. Когда краска высохнет, приступают к внутренней отделке и комплектации салона: устанавливают кресла, полки и другие элементы.

Длительность процесса сборки воздушного судна зависит от его размера и назначения. Например, продолжительность производства пассажирского среднемагистрального Ту-214 составляет около года. Поэтому актуальными являются разработка и внедрение в производственный процесс оборудования и технологий, сокращающих его сроки и трудоемкость.

Рассмотрим, как можно улучшить способ сборки фюзеляжа, а именно как можно автоматизировать сборку фюзеляжа, с уже готовыми шпангоутами с помощью специального устройства.

Шпангоуты имеют круглую форму и образуют каркас фюзеляжа. Шпангоуты располагают один за другим на оправке, которая поддерживает их в окончательном положении друг относительно друга. Затем шпангоуты соединяют друг с другом и с другими деталями каркаса и покрывают обшивкой. Стоит заметить, что такой способ сборки требует значительных затрат времени и средств на циклы сборки.

Улучшением процесса заключается в сокращении времени циклов и снижение соответствующих расходов, а также упрощение сборки секции фюзеляжа за счет ее автоматизации.

Поставленная задача решена в способе изготовления летательного аппарата, в котором, одну оправку пропускают через шпангоуты, установленные в кассете, и во время пропускания шпангоуты перемещают на оправке.

Оправку пропускают через кассету (рис.1), перед этим в кассету предварительно устанавливают шпангоуты, которые имеют плоскую и круглую форму.

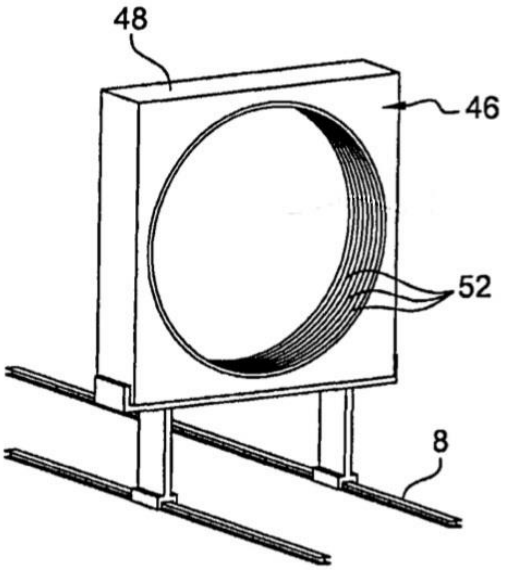


Рис. 1. Кассета
1 – корпус; *2* – лицевая сторона; *3* – шпангоуты; *4* – направляющие

Кассету можно загружать на удалении от сборочной линии, затем транспортировать к месту сборки. Операция заправки кассеты сама по себе не нарушает процесс сборки.

Шпангоуты входят в проем, будучи расположенными, каждый, в вертикальной плоскости, перпендикулярной к направляющей 4. Таким образом, шпангоуты расположены параллельно друг другу и коаксиально друг с другом, входят друг с другом в контакт и следуют один за другим.

Далее через шпангоуты, установленные в двух соответствующих кассетах, пропускают две оправки, перемещая оправки в направлении друг к другу.

Оправка (рис. 2) закреплена на кронштейне 1, при помощи которого она установлена с возможностью перемещения скольжением на направляющих 4 в направлении X. Предпочтительно через шпангоуты, установленные в двух соответствующих кассетах, пропускают две оправки, перемещая оправки в направлении друг к другу. Этот вариант осуществления является предпочтительным для случая, когда секция фюзеляжа имеет относительно большую длину по сравнению с его диаметром. Действительно, применение двух оправок позволяет уменьшить консольность.

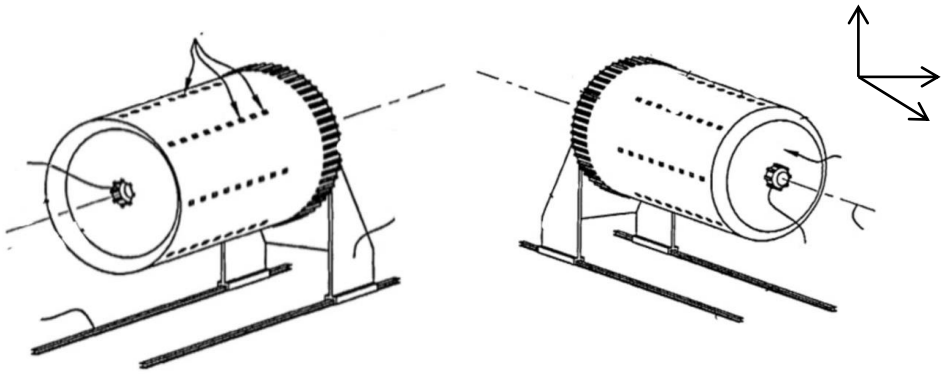


Рис. 2. Оправка: *а* – левая; *б* *б*

1 – кронштейн; *2* – отверстия; *3* – выемка для зубчатого соединения; *4* – направляющие; *5* – ось; *6* – зубчатое колесо; *7* – фронтальная сторона оправки

Внутри оправки предусмотрен соответствующий механизм для приведения этих элементов в действие.

Установка содержит средства для зацепления между двумя оправками при вращении, например, если необходимо привести во вращение одну оправку при помощи другой. В данном случае эти средства содержат зубчатое колесо 6.

Перемещение осуществляют таким образом, чтобы промежуток между шпангоутами на оправке превышал промежуток между ними в кассете, причем промежуток между ними на оправке предпочтительно равен промежутку между ними в летательном аппарате. Таким образом, еще больше упрощают сборку и еще больше способствуют ее автоматизации.

Установка содержит также две станины, связанные с соответствующими оправками, которая приводит во вращение эту оправку, когда она проходит через центральный проем. Каждая станина содержит корпус, имеющий форму, аналогичную форме корпуса кассет.

Этапы сборки:

На первом этапе, в каждую из кассет заправляют несколько шпангоутов. В данном случае эту загрузку осуществляют на удалении от сборочной линии, предварительно переместив оправку, чтобы удалить ее от других узлов установки. После заправки кассеты, ее устанавливают на направляющие 4.

Во время второго этапа, первую оправку пропускают через станину и через соответствующую кассету, перемещая первую оправку на направляющих 4. Точно так же поступают со второй оправкой, поэтому обе оправки перемещаются в направлении друг к другу, пока не войдут в контакт и не соединятся друг с другом. Далее они «разъезжаются», вовремя этого перемещения шпангоуты находятся напротив соответствующих отверстий 2. Таким образом, промежуток между ними становится больше, чем промежуток, который был между ними в положении хранения в кассете. В настоящем примере этот промежуток соответствует промежутку, который будет между шпангоутами в конечном положении на самолете.

На третьем этапе все шпангоуты оказываются выгруженными из кассет (которые теперь являются пустыми) и распределены на оправках. Оправки соединяют, и их стороны образуют сплошную цилиндрическую поверхность.

В конечном этапе, на установку доставляют панель обшивки. Предпочтительно эта панель обшивки содержит предварительно собранные на ней стрингеры. Панель обшивки располагают и крепят на шпангоутах. Стрингеры проходят в направлении X.

Библиографический список

1. Е.Г. Подружин, В.М. Степанов, П.Е. Рябчиков // Конструирование и проектирование летательных аппаратов. Фюзеляж: учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – Москва: издательство Юрайт, 2024 г. – 105 с.

2. Р.И. Гусева. // Особенности технологии сборки планера. – ФГБОУ «КнАГТУ», 2013 г. – 133 с.

3. Ф.А. Волошин, А.Н. Кузнецов, В.Я. Покровский, А.Я. Соловьев // Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание. Фюзеляж: учебное пособие для вузов. 1975г. – 150 с.

4. А.Л. Абибов, Н.М. Бирюков, В.В. Бойцов и др. Под ред. А.Л. Абибова // Технология самолетостроения: учебник для авиационных вузов. – 2-е изд. – Москва, 1982г. – 551 с.

5. Способ и установка для изготовления секции фюзеляжа летательного аппарата [Электронный ресурс] URL: *https://patents.s3.yandex.net/RU2525590C2_20140820* (Дата обращения: 17.11.24)

© Хисамитдинова Ю.Г., 2024

УДК 621.45

Н.Д. ЦЫПАЕВ
tsypaevnd@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент. А.В. ЗЫРЯНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ДИАГНОСТИКА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ТЕРМГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Аннотация: в работе исследуются методы диагностики газотурбинных двигателей (ГТД) на основе анализа термогазодинамических параметров для своевременного выявления предотказных состояний. Объектом изучения выбран компактный ГТД *SR-30*, используемый в образовательных и научных целях. Проведён анализ изменений параметров двигателя в штатном и предотказном режимах, что позволяет определить влияние эксплуатационных дефектов на эффективность работы и обосновывает необходимость внедрения систем ранней диагностики.

Ключевые слова: диагностика; термгазодинамические параметры; искусственный интеллект; прогнозирование отказов; моделирование процессов.

Газотурбинный двигатель (ГТД) включает сложные и дорогие элементы, работающие при высоком давлении и температуре газа. Отказ или снижение характеристик двигателя значительно влияют на его работу. Производительность ГТД зависит от состояния компонентов газового тракта: компрессора, камеры сгорания и турбины.

Изменение производительности может быть связано с внепроектной эксплуатацией: изменением нагрузки, температуры окружающей среды или подачи топлива. Эффективность также может снижаться из-за износа или неисправностей, таких как загрязнение, эрозия, изменение радиальных зазоров, коррозия и другие повреждения, что вызовет ухудшение мощности и коэффициента полезного действия (КПД) компонентов, вызывая отклонения измеряемых параметров двигателя. Для предотвращения подобных неисправностей необходимо внедрить механизм раннего выявления, классификации и оценки дефектов. Это позволит своевременно принимать меры для восстановления нормальной работы двигателя.

Цель данного исследования заключается в разработке подходов и методов технической диагностики газотурбинного двигателя (ГТД) на основе анализа его термогазодинамических параметров. Основная задача состоит в выявлении предотказного состояния двигателя и возможность определения дефектов.

Объектом исследования выбран компактный газотурбинный двигатель *SR*- 30 от *Turbine Technologies*, широко применяемый в образовательных и научных целях. Простая конструкция, небольшие размеры и доступная техническая документация делают его идеальным для изучения термогазодинамических процессов, диагностики и лабораторных экспериментов.

При этом основными исходными данными расчета теромогазодинамической модели двигателя – являются значения параметров, представленные в таблице 1

Таблица 1

Параметры	Обозначения, размерность	Числовые значения
Расход воздуха	Gв, кг/с	0,222
Степень повышения давления в компрессоре	πк*	1,5
Частота вращения ротора двигателя	*N*, Об/мин	70000
Расход топлива	*G*т, кг/с	0,003
Температура перед турбиной	*T*г*, K	984,15
Тяга двигателя	*P, N*	44

На рисунках 1 и 2 представлены результаты термогазодинамического анализа малоразмерного газотурбинного двигателя SR-30 в стендовых условиях (H = 0, Mп = 0) в штатном режиме работы, а также в случае возникновения предотказного состояния соответственно.

Station	W	T	P	WRstd			
amb		298,15	101,325				
2	0,210	298,15	98,285	0,220			
3	0,210	352,62	147,428	0,160			
31	0,208	352,62	147,428				
4	0,211	984,15	143,005	0,276			
41	0,211	984,15	143,005	0,276			
49	0,211	934,59	108,002				
5	0,213	928,92	108,002	0,359			
6	0,213	928,92	107,462				
8	0,213	928,92	107,462	0,361			
P2/P1 = 0,9700		P6/P5 = 0,9950		CD8 = 0,8717			
Efficiencies:		isentr	polytr	RNI	P/P		
Compressor		0,6700	0,6882	0,916	1,500		
Burner		0,9834			0,970		
Turbine		0,7500	0,7434	0,180	1,324		
Spool mech		0,9500	Nominal Spd		70000		

FN	=	0,04	
TSFC	=	91,5329	
FN/W2	=	180,04	
Prop Eff	=	0,0000	
eta core	=	0,0243	
WF	=	0,00346	
s NOx	=	0,02964	
XM8	=	0,2982	
A8	=	0,0036	
P8/Pamb	=	1,0606	
Ang8	=	20,00	
W_NGV/W2	=	0,00000	
WCL/W2	=	0,01080	
Loading %=		100,00	
WBld/W2	=	0,00000	
ZWBld	=	0,00000	
PWX	=	0,00000	

Fuel	FHV	humidity	war2
Generic	42,900	0,0	0,0000

Рис. 1. Термогазодинамический расчет *SR*-30 в штатном режиме работы

Station	W	T	P	WRstd			
amb		298,15	101,325				
2	0,210	298,15	98,285	0,220			
3	0,210	352,62	147,428	0,160			
31	0,208	352,62	147,428				
4	0,211	984,15	143,005	0,276			
41	0,211	984,15	143,005	0,276			
49	0,211	934,59	106,359				
5	0,213	928,92	106,359	0,365			
6	0,213	928,92	105,827				
8	0,213	928,92	105,827	0,367			
P2/P1 = 0,9700		P6/P5 = 0,9950		CD8 = 0,8687			
Efficiencies:		isentr	polytr	RNI	P/P		
Compressor		0,6700	0,6882	0,916	1,500		
Burner		0,9834			0,970		
Turbine		0,7125	0,7049	0,180	1,345		
Spool mech		0,9500	Nominal Spd		70000		

FN	=	0,03	
TSFC	=	106,2930	
FN/W2	=	155,04	
Prop Eff	=	0,0000	
eta core	=	0,0185	
WF	=	0,00346	
s NOx	=	0,02964	
XM8	=	0,2562	
A8	=	0,0042	
P8/Pamb	=	1,0444	
Ang8	=	20,00	
W_NGV/W2	=	0,00000	
WCL/W2	=	0,01080	
Loading %=		100,00	
WBld/W2	=	0,00000	
ZWBld	=	0,00000	
PWX	=	0,00000	

Fuel	FHV	humidity	war2
Generic	42,900	0,0	0,0000

Рис. 2. Термогазодинамический расчет *SR*-30 при возникновении предотказного состояния

По анализу термогазодинамических параметров работы двигателя SR-30 видно, что в первом расчетном случае параметры двигателя работают в штатном режиме. Полное давление за турбиной составляет 108,002 кПа, удельный расход топлива равен 91,53 кг/(Н·ч), удельная тяга достигает 180,04 кг/(Н·ч), а тяга двигателя составляет 40 Н. Эти значения соответствуют штатной работе двигателя, обеспечивая его эффективность и стабильность. Во втором случае наблюдаются изменения параметров: полное давление за

турбиной снизилось до 106,359 кПа, удельный расход топлива увеличился до 106,29 кг/(Н·ч), удельная тяга уменьшилась до 155,8 кг/(Н·ч), а тяга двигателя упала до 30 Н. Эти изменения свидетельствуют о нарушении работы турбины, что, вероятно, связано с изменяем геометрии аэродинамического профиля лопаток в процессе длительной эксплуатации газотурбинного двигателя, на поверхности которого могли скопиться частицы пыли, масла и продуктов сгорания топлива. В результате снижается степень преобразования тепловой энергии рабочего тела в механическую работу. Эти факторы приводят к уменьшению коэффициента полезного действия турбины на 5% от её нормативного значения, что оказывает значительное влияние на общую эффективность работы двигателя.

Газотурбинные двигатели, включая модель *SR*-30, являются высокотехнологичными устройствами, чувствительными к изменениям рабочих параметров. Анализ термогазодинамических характеристик *SR*-30 в штатном режиме и при предотказном состоянии показал, что нарушение работы турбины приводит к значительным изменениям ключевых параметров, таких как снижение полного давления за турбиной, уменьшение удельной и общей тяги, а также увеличение удельного расхода топлива.

Основной причиной подобных изменений является деградация компонентов двигателя, вызванная износом, загрязнением или эрозией лопаток турбины.

Для предотвращения таких последствий и поддержания надежной работы двигателя требуется использование методов ранней диагностики, основанных на мониторинге термогазодинамических параметров. Это позволит своевременно выявлять дефекты, предотвращать их развитие и сохранять эффективность работы двигателя.

Библиографический список

1. Басаргин, А.А. Методы искусственного интеллекта: учебное пособие / А.А. Басаргин. – Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – 164 с.

© Цыпаев Н.Д., 2024

УДК 629.7

Д.Р. Шарафутдинов
ds767206@gmail.com
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Б.Р. Абдуллин

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛОНЖЕРОНОВ НЕСУЩЕГО ВИНТА

Аннотация: полимерные композиционные материалы (ПКМ) имеют высокие удельную и усталостную прочность, жесткость, коррозионную стойкость,

обладают хорошей демпфирующей способностью. Эти свойства в сочетании с низким удельным весом обусловили их широкое распространение в авиастроительной отрасли в том числе и производстве лонжеронов.
Ключевые слова: лонжерон, композиционные материалы, авиастроительная отрасль.

Лонжерон основной силовой элемент лопасти. Существуют несколько видов лопастей с разными типами лонжеронов: лопасти с металлическим прессованным лонжероном, лопасти со стальным трубчатым лонжероном, многолонжеронные металлические лопасти, композиционные лопасти.

В лопастях с металлическим прессованным лонжероном основным силовым элементом является полый прессованный лонжерон *D*-образного сечения. Лонжерон выполняется пустотелым, прилегающим к аэродинамическому контуру передней части профиля. Для повышения прочности лонжерон может иметь ребра жесткости. К передней кромке лонжерона приклеивается нагревательный элемент противообледенительной системы. Сверху этот элемент закрывается титановой или стальной оковкой, предохраняющей лопасть от эррозионных воздействий частиц.

В канал лонжерона, в переднюю его часть, вклеиваются противофлаттерные грузы. В комлевой части лонжерона на болтах крепится узел навески лопасти. В концевой части, под съемным обтекателем, располагаются балансировочные грузы. Внутри концевого обтекателя может быть установлена лампа контурного огня.

Лопасти со стальным трубчатым лонжероном применяются на тяжелых вертолетах, в частности на Ми-26. Одна из особенностей лопастей, именно этого вертолета, является отсутствие комлевого наконечника. Весь лонжерон, включая проушины комлевого стыка, изготавливается как единое целое. Отсутствие комлевого наконечника позволяет увеличить ресурс и уменьшить массу лопасти. Лопасть состоит из общей носовой части и отдельных хвостовых отсеков, а также комлевого и концевого обтекателей.

Лонжерон воспринимает все нагрузки от носовой части и хвостовых отсеков лопасти с помощью специальных стеклопластиковых компенсаторов. Труба лонжерона облицована по наружному диаметру слоем стеклопластика для обеспечения прочного соединения лонжерона с каркасом, защиты его от коррозии и для образования каналов системы сигнализации о повреждении лонжерона.

Многолонжеронные металлические лопасти разработаны специально для боевых летательных аппаратов. В местах склейки полок лонжеронов прокладываются слои стеклоткани, препятствующие распространению трещин

с одного силового элемента на другой. Имея запас прочности, лопасть, может выполнять несущие функции даже после разрушения одного или нескольких лонжеронов, что является весьма важным для вертолета, участвующего в боевых операциях. Многократное дублирование лонжеронов позволяет также отказаться от системы предупреждения появления трещин. Лопасти имеют большой ресурс, но весьма сложны в производстве.

Композиционные лопасти на сегодняшний день, являются самыми распространенными в мире. В России их применяют на вертолетах Ми-28, Ми-34, Ка-50 и др. Конструкции композиционных лопастей весьма многообразны. Достаточно простые лопасти подразумевают использование С-образного лонжерона и пористого или сотового заполнителя. Более сложные лопасти имеют многозамкнутый лонжерон и приклеенную хвостовой отсек. Такие лонжероны обладают высокой живучестью, так как при разрушении лонжерона в районе одной из полостей другие могут сохранять несущую способность.

В работе рассмотрены лонжероны из композиционных материалов. Композитным конструкциям можно придать сложные аэродинамические формы, а регулируемая анизотропия материала позволяет создавать требуемую жесткость в пределах заданных аэродинамических и аэроупругих параметров. В результате достигается большая аэродинамическая эффективность винтов, определяемая отношением подъемной силы к аэродинамическому сопротивлению. Существует два метода их изготовления: методом намотки и выкладки.

В практике ОКБ Камова Н.И. выбрана технология изготовления лонжеронов методом выкладки из различных тканей [2].

Листы материала лонжерона собирают в пакеты и подвергают предварительной опрессовке в автоклаве при невысокой температуре. Листы при этом слипаются, пакеты приобретают необходимые для дальнейшей сборки форму и жесткость, а полимеризации связующего практически не происходит. После опрессовки пакеты представляют собой профиль открытого контура.

Затем пакеты собираются совместно с центровочными грузами, нагревательным элементом и комлевыми пластинами в один блок, внутри которого располагается технологическая резиновая пресс-камера. Блок пакетов с пресс-камерой помещают в специальную пресс-форму, внутренний контур которой соответствует внешнему контуру носовой части лопасти.

В пресс-камеру подается сжатый азот, а пресс-форму нагревают. При этом лонжерон приобретает необходимую форму, связующее полимеризуется и все элементы лонжерона прочно склеиваются между собой. По окончании процесса прессования лонжерон извлекают из пресс-формы, удаляют из него пресс-камеру и обрезают припуски.

Метод намотки однонаправленной лентой на оправке широко применяется при крупном серийном производстве, где целесообразно максимально автоматизировать процесс изготовления [1].

Препрегу образованную системой нитей пропитывают полимерным связующим. На вращающуюся или неподвижную оправку, имеющую

конфигурацию внутренней поверхности изделия, ленту подают и укладывают на ней в различных направлениях. На оправку предварительно наносят антиадгезионный слой. Контактное давление создают технологическим натяжением армирующего композиционного материала. Для получение необходимой толщины и структуры проводят отверждение и удаляют технологическую оправку.

Оба этих метода широко применяются в изготовлении.

При методе накладки лопасти вертолетов создаются в технологически сложных условиях, могут возникнуть явления непропрессовки и (или) перепрессовки пакетов. Однако в отличие от намоточной технологии здесь отсутствуют генетические, неустранимые дефекты.

Композиционные лопасти, изготовленные по укладочной технологии, легко переносят неизбежное увеличение переменных напряжений, возникающее в полете. Кроме того, технология укладки позволяет создавать лопасти различной геометрии, в том числе и трапециевидные, а также варьировать формы концевой ее части (законцовки).

При намоточной технологии основные операции механизированы, следовательно, обеспечиваются более высокая стабильность и более низкая стоимость. Для обеспечения стабильности конструкции чрезвычайно важно, чтобы нити располагались в строго определенных направлениях. Необходимо также избегать появления складок – главного повреждающего фактора [3].

Изготовление лонжеронов лопастей методом намотки позволяет получить монолитную конструкцию без швов и соединений. Вследствие этого при одинаковой массе конструкции такие лонжероны обладают более высокими запасами прочности и живучести по сравнению с лонжеронами, изготовленными методом ручной укладки.

Метод намотки по сравнению с укладкой значительно лучше противостоит опасности возникновения складок – главного повреждающего фактора для слоистых композиционных материалов, исключает ручные операции из процесса формирования изделия и является вследствие этого потенциально более стабильным производственным процессом [1].

Вследствие более высокой стабильности процесса, снижения потребности в производственных площадях и в количестве технологических операций, оснастки и оборудования метод намотки позволяет снизить стоимость производства лопастей из композиционных материалов.

В заключение можно сказать, что композитные лопасти лонжеронной конструкции, спроектированные под укладочную технологию, не имеют преимуществ по ресурсам изготавливаемых по намоточной технологии. Кроме того, процесс намотки является более стабильным, экономически выгодным и лонжероны, полученные данным методом, обладают более высокими запасами прочности и живучести.

Библиографический список

1. Попов Ю.О. Новое поколение материалов и технологий для изготовление лонжеронов лопастей вертолетов / Ю.О. Попов, Т.В. Колокольцев, А.В. Хрульков // Журнал ВИАМ. — 2014. —URL:*https*://*journal.viam.ru*/*ru*/*system*/*file*s/*uploads*/*pdf*/2014/2014_*S*2_1_1.*pdf*(дата обращения: 20.11.2024) —Текст: электронный.

2. Далин В.Н. Конструкция вертолетов:учебник / В.Н. Далин, С.В. Михеев — Москва: Издательство МАИ, 2001. —352с. —URL:*https*://*djvu.online*/*file*/*JuDs*9*uKSK*0*hwN*?*ysclid=m*3*yrwvd*11*t*998685903(дата обращения: 27.11.2024). —Текст: электронный.

3. Шнуров З.Е. Выкладка или намотка?! / З.Е. Шнуров // Журнал Журнал Вертолет — 2000. —№ 01—URL:https://*military.wikireading.ru*/*hb*5*YGLtxhw*(дата обращения: 27.11.2024). —Текст: электронный.

© Шарафутдинов Д.Р., 2024

СЕКЦИЯ 1.2. ДВИГАТЕЛИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 621.89.097.3

Н.Е. ИВАНОВ
Nikita.ivan2001@yandex.ru
Науч. руковод. – докт. техн. наук, проф. И.М. ГОРЮНОВ

Уфимский университет науки и технологий

РЕГУЛИРУЕМОЕ СОПЛО НАРУЖНОГО КОНТУРА

Аннотация: в данной работе раскрыта актуальность рассматриваемой темы, проведен анализ способов снижения шума от наружного контура с помощью регулируемого сопла, рассмотрены перспективные варианты конструкций регулируемых сопел, выполнено сравнение основных характеристик эффективности для двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) с нерегулируемым и регулируемым соплом наружного контура.
Ключевые слова: ТРДД; регулируемое сопло; снижение уровня шума; повышение экономичности.

В настоящее время авиадвигателестроительные компании при создании новых и модернизации старых двигателей сталкиваются с серьезной проблемой: основные параметры рабочего процесса, такие как суммарная степень повышения давления, температура газа на выходе из камеры сгорания, КПД узлов, приближаются к своему пику, и необходимо искать альтернативные способы улучшения основных характеристик газотурбинных двигателей (ГТД).

В рамках НИОКР ГНЦ ФАУ «ЦИАМ» по созданию авиационных газотурбинных двигателей 6 поколения изучаются критические технологии улучшения основных характеристик эффективности ГТД: тяги и удельного расхода топлива. Одной из таких критических технологий является применение регулируемого сопла наружного контура.

Реактивное сопло наружного контура предназначено для формирования максимального импульса потока в нужном направлении. В ТРДД 4 и 5 поколений практически все сопла наружного контура являются нерегулируемыми, так как из-за достаточно небольших степеней двухконтурности и степеней повышения давления вентилятора эффект от изменения конфигурации сопла был минимальным. При этом основные виды используемых конструкций регулируемых сопел (например, сопло Лаваля) достаточно сильно усложняют и утяжеляют конструкцию двигателя.

Однако современные тенденции развития двигателей, такие как увеличение степени двухконтурности и степени повышения давления вентилятора, указывают на возможность значительного улучшения показателей при использовании регулируемого сопла наружного контура. Но при этом

необходимо внедрять перспективные системы регулирования сопла, которые будут обладать минимальной массой.

Также данным способом возможно поспособствовать решению важной проблемы для ТРДД, а именно, снизить шум от вентилятора и выходной струи наружного контура.

Анализ параметров ТРДД с регулируемым соплом (РС).

Для анализа возможности применения регулируемого сопла наружного контура и оценки его влияния на параметры ТРДД был выбран перспективный двигатель ПД-14.

Математическая модель для термогазодинамического расчета данного ТРДД была построена в ПО DVIGwT.

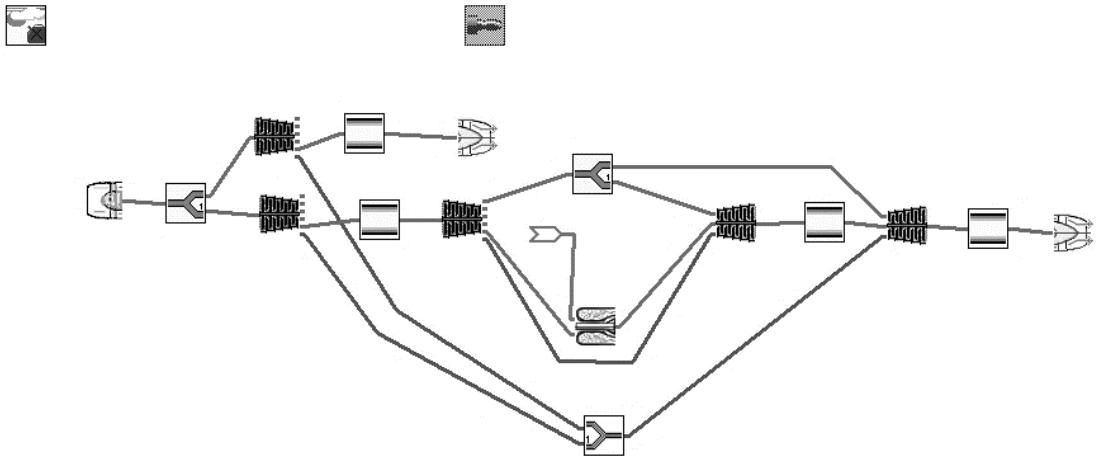


Рис. 3. Схема математической модели двигателя в ПО DVIGwT

Расчет проводился на двух режимах:

– взлетный $H_п = 0$ м, $M_п = 0$;

– крейсерский $H_п = 11000$ м, $M_п = 0{,}8$.

Погрешность определения тяги, расхода топлива и основных параметров узлов ТРДД не превышает 3%.

На рис. 2 и 3 приведены параметры сопла наружного контура в результате термогазодинамического расчета двигателя на взлетном и крейсерском режимах соответственно.

Перепад давления на сопле наружного контура:

– на взлетном режиме докритический (1,4728), используется полностью с суживающимся РС;

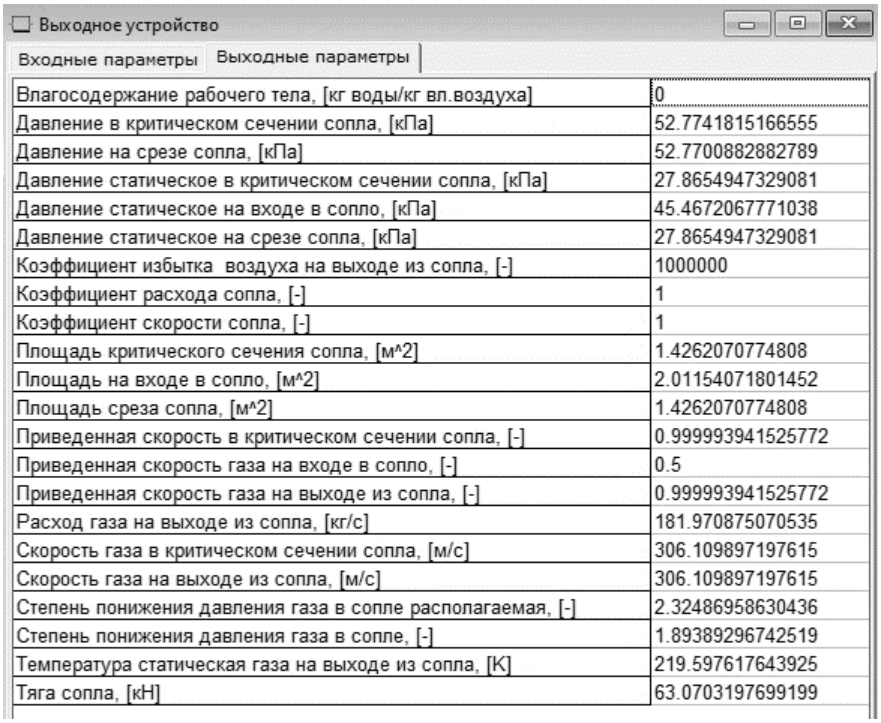
– на крейсерском режиме сверхкритический (2,3249), используется не полностью при применении суживающегося РС.

Для полной реализации перепада давлений на крейсерском режиме в сопле наружного контура возможно применение суживающе-расширяющегося сопла (сопло Лаваля).



Влагосодержание рабочего тела, [кг воды/кг вл.воздуха]	0
Давление в критическом сечении сопла, [кПа]	148.630418390341
Давление на срезе сопла, [кПа]	148.630418390341
Давление статическое в критическом сечении сопла, [кПа]	101.325279192393
Давление статическое на входе в сопло, [кПа]	128.581210286697
Давление статическое на срезе сопла, [кПа]	101.325279192393
Коэффициент избытка воздуха на выходе из сопла, [-]	1000000
Коэффициент расхода сопла, [-]	0.997
Коэффициент скорости сопла, [-]	0.995
Площадь критического сечения сопла, [м^2]	1.43902703889254
Площадь на входе в сопло, [м^2]	1.90927106566885
Площадь среза сопла, [м^2]	1.43902703889254
Приведенная скорость в критическом сечении сопла, [-]	0.78856422000217
Приведенная скорость газа на входе в сопло, [-]	0.5
Приведенная скорость газа на выходе из сопла, [-]	0.78856422000217
Расход газа на выходе из сопла, [кг/с]	452.340219205809
Скорость газа в критическом сечении сопла, [м/с]	260.544269770544
Скорость газа на выходе из сопла, [м/с]	260.544269770544
Степень понижения давления газа в сопле располагаемая, [-]	1.472823
Степень понижения давления газа в сопле, [-]	1.47281886650921
Температура статическая газа на выходе из сопла, [K]	291.682484915989
Тяга сопла, [кН]	117.855061317367

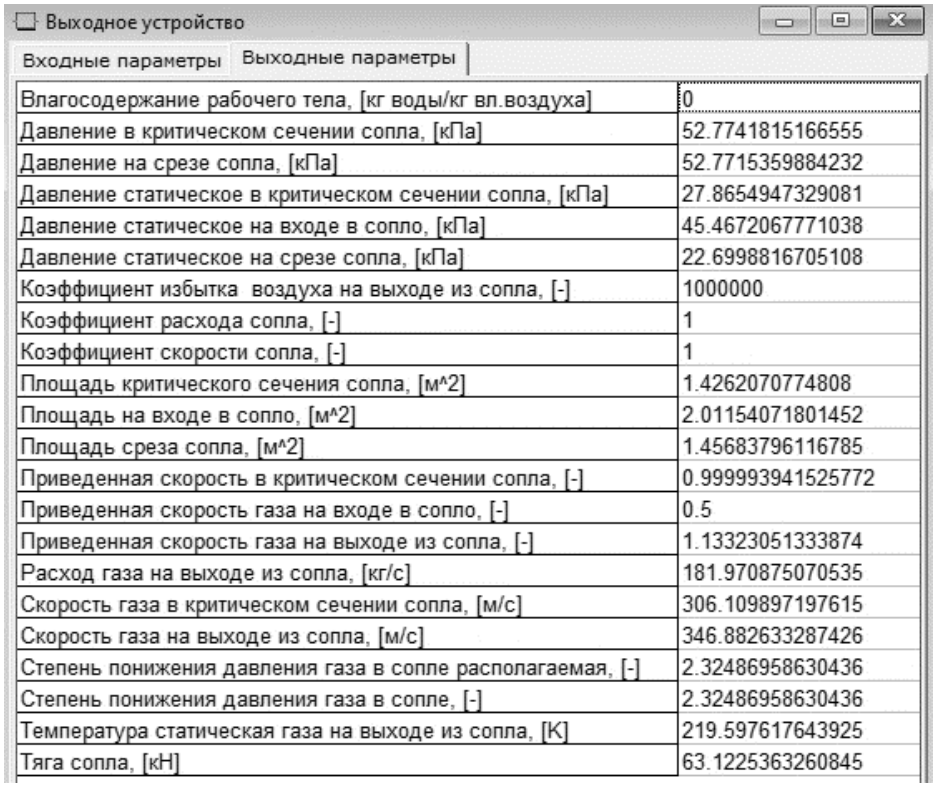
Рис. 2. Параметры сопла наружного контура в результате термогазодинамического расчета двигателя на взлетном режиме



Влагосодержание рабочего тела, [кг воды/кг вл.воздуха]	0
Давление в критическом сечении сопла, [кПа]	52.7741815166555
Давление на срезе сопла, [кПа]	52.7700882882789
Давление статическое в критическом сечении сопла, [кПа]	27.8654947329081
Давление статическое на входе в сопло, [кПа]	45.4672067771038
Давление статическое на срезе сопла, [кПа]	27.8654947329081
Коэффициент избытка воздуха на выходе из сопла, [-]	1000000
Коэффициент расхода сопла, [-]	1
Коэффициент скорости сопла, [-]	1
Площадь критического сечения сопла, [м^2]	1.4262070774808
Площадь на входе в сопло, [м^2]	2.01154071801452
Площадь среза сопла, [м^2]	1.4262070774808
Приведенная скорость в критическом сечении сопла, [-]	0.999993941525772
Приведенная скорость газа на входе в сопло, [-]	0.5
Приведенная скорость газа на выходе из сопла, [-]	0.999993941525772
Расход газа на выходе из сопла, [кг/с]	181.970875070535
Скорость газа в критическом сечении сопла, [м/с]	306.109897197615
Скорость газа на выходе из сопла, [м/с]	306.109897197615
Степень понижения давления газа в сопле располагаемая, [-]	2.32486958630436
Степень понижения давления газа в сопле, [-]	1.89389296742519
Температура статическая газа на выходе из сопла, [K]	219.597617643925
Тяга сопла, [кН]	63.0703197699199

Рис. 3. Параметры сопла наружного контура в результате термогазодинамического расчета двигателя на крейсерском режиме

На рис. 4 приведены параметры суживающе-расширяющегося сопла наружного контура двигателя на крейсерском режиме в результате термогазодинамического расчета.



Влагосодержание рабочего тела, [кг воды/кг вл.воздуха]	0
Давление в критическом сечении сопла, [кПа]	52.7741815166555
Давление на срезе сопла, [кПа]	52.7715359884232
Давление статическое в критическом сечении сопла, [кПа]	27.8654947329081
Давление статическое на входе в сопло, [кПа]	45.4672067771038
Давление статическое на срезе сопла, [кПа]	22.6998816705108
Коэффициент избытка воздуха на выходе из сопла, [-]	1000000
Коэффициент расхода сопла, [-]	1
Коэффициент скорости сопла, [-]	1
Площадь критического сечения сопла, [м^2]	1.4262070774808
Площадь на входе в сопло, [м^2]	2.01154071801452
Площадь среза сопла, [м^2]	1.45683796116785
Приведенная скорость в критическом сечении сопла, [-]	0.999993941525772
Приведенная скорость газа на входе в сопло, [-]	0.5
Приведенная скорость газа на выходе из сопла, [-]	1.13323051333874
Расход газа на выходе из сопла, [кг/с]	181.970875070535
Скорость газа в критическом сечении сопла, [м/с]	306.109897197615
Скорость газа на выходе из сопла, [м/с]	346.882633287426
Степень понижения давления газа в сопле располагаемая, [-]	2.32486958630436
Степень понижения давления газа в сопле, [-]	2.32486958630436
Температура статическая газа на выходе из сопла, [К]	219.597617643925
Тяга сопла, [кН]	63.1225363260845

Рис. 4. Параметры суживающе-расширяющегося сопла наружного контура двигателя на крейсерском режиме в результате термогазодинамического расчета

Тяга сопла наружного контура при использовании суживающе-расширяющегося сопла увеличилась на 0,082%.

При этом тяга ТРДД в целом увеличилась на 0,21% (с 24,33 кН до 24,38 кН, соответственно), удельный расход топлива уменьшился на 0,21%.

В условиях, когда производители ГТД борются за каждый процент удельного расхода топлива, данное улучшение параметров будет оправдано, если управляемое РС не будет сильно утяжелять и усложнять ТРДД.

Анализ исследований по снижению шума регулируемым соплом наружного контура.

Снижение шума может быть достигнуто путём регулирования РС наружного контура с использованием нескольких методов, таких как регулирование проходного сечения реактивного сопла для обеспечения оптимального режима работы вентилятора с меньшим уровнем шума в децибелах.

Берлинский технический университет произвел анализ шума от вентилятора при возможности регулирования проходного сечения сопла наружного контура [2].

На рис. 5 показано возможное снижение шума на различных режимах полета.

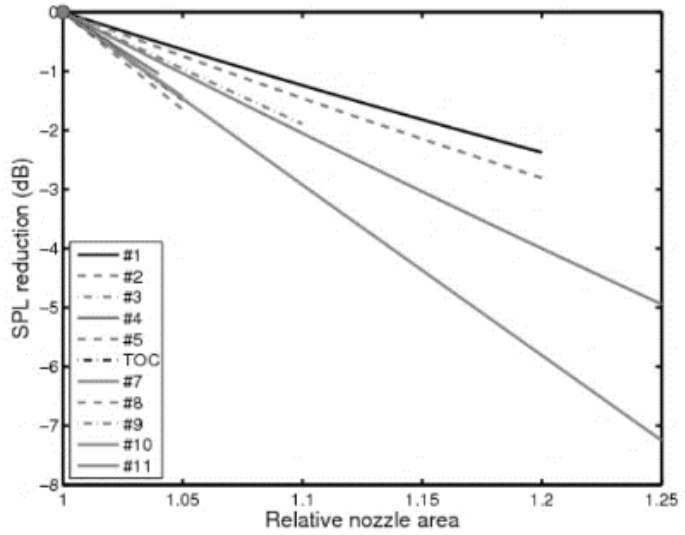


Рис. 5. Снижение шума в зависимости от увеличения площади сопла для исследуемых условий полета [2]

Линия 2 показывает снижение шума на начальном этапе набора высоты. Видно, что при увеличении относительной площади сопла на 15% снижение шума струи может достигать 2 дБ. Линия 10 показывает совокупное снижение уровня шума, которое может достигать 5,5 дБ при увеличении относительной площади сопла на 20%.

При применении шевронных сопел снижение шума струи происходит благодаря интенсификации процесса смешения внешнего потока и струи сопла, что приводит к трансформации спектра шума струи. Уровень шума на низких частотах уменьшается, а на высоких частотах увеличивается.

Результаты исследования сопла с шевронами приведены на рис. 6 [3].

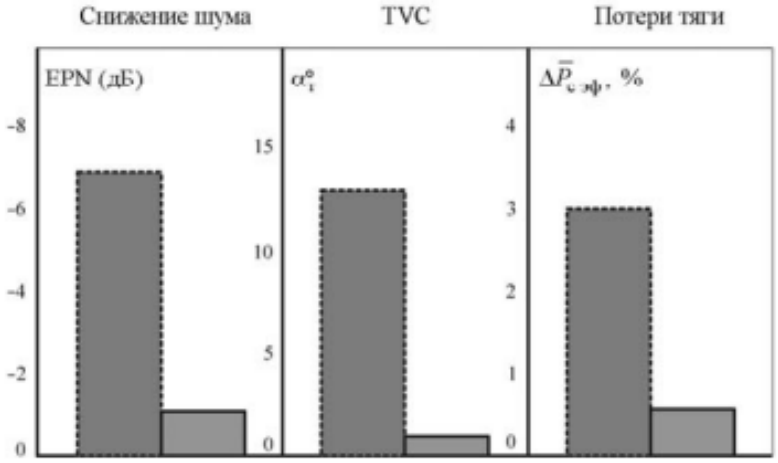


Рис. 6. Обобщенные результаты исследования сопла с шевронами

Первые столбцы на диаграммах показывают результаты сопла с регулируемыми шевронами, вторые с нерегулируемыми. Видно, что

возможность заглублять шевроны в поток позволяет снизить шум до 7 дБ, отклонить струю до 12° (позволяет при взлете / посадке повысить управляемость и устойчивость самолета). При этом потери эффективной тяги сопла составляют 3%, но благодаря регулировке на крейсерском режиме возможно снижение потерь тяги сопла до 0,5%.

Возможные конструктивные схемы регулируемых сопел наружного контура.

«Ирисовое» сопло является разновидностью сопла Лаваля. Оно имеет один венец регулируемых створок. Створки перемещаются в продольном направлении по криволинейным направляющим, установленным в оболочке наружного контура.

На режимах докритического перепада створки смещаются назад (рис. 7, *а*), при этом, благодаря сложной пространственной кинематике, они поворачиваются во внутреннюю сторону, образуя суживающееся сопло. На режимах сверхкритического перепада створки смещаются вперед и поворачиваются во внешнюю сторону (рис. 7, *б*). Благодаря *S*-образной форме створок это обеспечивает не только увеличение площади $F_{кр}$, но и превращение звукового сопла в сверхзвуковое.

Данные сопла достаточно просты конструктивно и имеют небольшую массу. Также, благодаря форме створок, они обладают малым внешним сопротивлением. Недостатком данных сопел являются небольшие диапазоны регулирования, что ограничивает диапазоны работы до $M_{п}$ = 1,5…2, но для гражданских двигателей данного диапазона хватает на всех режимах полета [1].

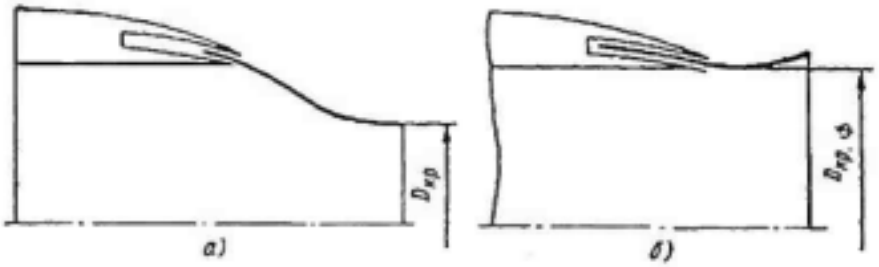


Рис. 7. Схема «ирисового» сопла: *а*) – положение при докритическом расширении; *б*) – положение при сверхкритическом расширении

Регулирование данного типа сопла может производиться с помощью достаточно простых и относительно легких различных механических передач, как, например, в [4].

Сопло с регулируемыми шевронами применяется для снижения шума реактивной струи. Снижение шума струи с помощью шевронов основано на интенсификации процесса смешения внешнего потока и струи сопла, при этом происходит трансформация спектра шума струи. Уровень шума на низких частотах снижается, а на высоких растет. Чем больше угол заглубления

шевронов в сопло, тем сильнее трансформируется спектр шума струи, поэтому при больших углах заглубления шевронов отрицательный эффект увеличения шума на высоких частотах может перекрыть положительный эффект снижения шума на низких частотах, в результате чего суммарный уровень шума сопла с шевронами будет выше, чем без шевронов. Это означает, что для каждой конфигурации шевронов существует оптимальный угол заглубления, при котором снижение шума струи на выбранном режиме максимально.

Воздействуя на струю, шевроны приводят к изменению тяговых характеристик сопла. При этом в зависимости от формы сопла и шевронов существует оптимальный угол заглубления шевронов в сопло, при котором потери тяги сопла с шевронами на крейсерском режиме минимальны. В общем случае оптимальные акустический и тяговый углы не равны, поскольку даже незначительное отклонение угла установки шевронов от оптимального тягового угла в полете может привести к существенному ухудшению экономичности двигателя. В связи с этим на двигателестроительных фирмах проводятся исследования по разработке схем управления углами отклонения шевронов в полете. Это позволит при взлете самолета устанавливать угол шевронов для максимального снижения шума, а в полете оптимальный тяговый угол.

Управление шевронами может быть осуществлено различными способами. Наиболее перспективные из них следующие схемы.

Схема с использованием материала с памятью формы, например, никелида титана (рис. 8).

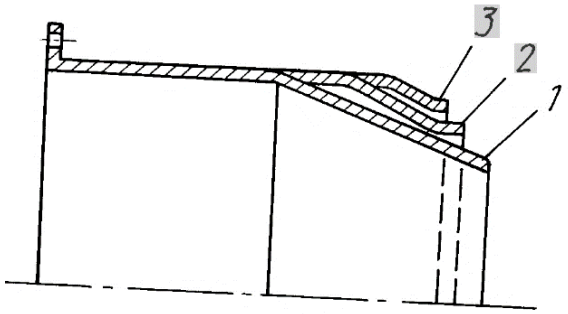


Рис. 8. Схема регулирования шевронов из никелида титана

Эффект «памяти» формы присущ многим материалам. Однако эффект «памяти» формы на никелиде титана, в отличие от подобных эффектов у других материалов, уникален. Он полностью обратим, может повторяться в течение многих тысяч циклов. Материал обладает хорошими механическими свойствами, прочен, пластичен, коррозионно стоек.

Реактивное сопло, изготовленное по предложенному способу (рис.9), работает следующим образом. На режиме взлет реактивное сопло имеет заданную геометрическую форму 3 (см. рис. 8).

В процессе разгона и набора высоты самолетом происходит понижение температуры окружающего воздуха. При достижении материалом сопла

температуры конца прямого мартенситного превращения сопло принимает геометрическую форму 2, соответствующую крейсерскому режиму [5].

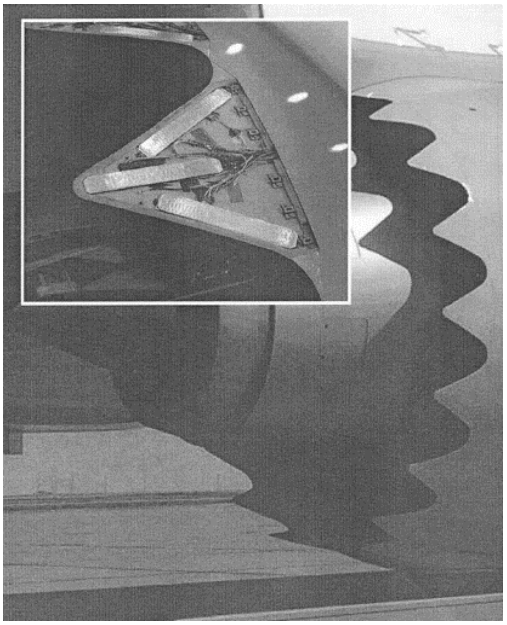


Рис. 9. Шевроны с памятью формы на сопле Boeing 777-300ER

Схема с использованием пластин с разными коэффициентами линейного расширения (рис. 10). Внутренние и внешние тонкие пластинки имеют различные коэффициенты расширения и располагаются одна против другой с полным плоским контактом таким образом, чтобы изменения температуры приводили к искривлению указанной конструкции типа биметаллической пластинки в результате разницы между данными коэффициентами расширения. Средства нагревания содержат электрические сопротивления, размещенные на поверхности тонких металлических пластинок и находящиеся в тепловом контакте с ними [6].

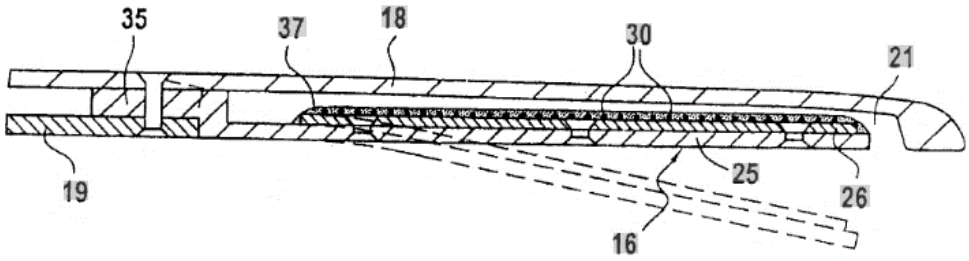


Рис. 40. Схема регулирования сопла с помощью пластин с разными коэффициентами линейного расширения

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что на ТРДД со схожими параметрами применение регулируемого суживающе-расширяющегося сопла наружного контура может снизить удельный расход топлива на 0,21%, при этом аналогично увеличивая тягу двигателя.

При этом можно сказать, что выигрыш от применения регулировки сопла наружного контура будет тем выше, чем больше степень повышения давления вентилятора, так как при этом будет расти степень понижения давления на сопле наружного контура. Влияние на общую тягу двигателя будет тем больше, чем выше значение степени двухконтурности, так как при этом растет отношение тяги наружного контура к тяге внутреннего контура ТРДД.

В результате анализа возможных конструктивных вариантов исполнения регулируемых сопел наружного контура можно заключить, что перспективным конструктивным решением данного узла является «ирисовое» сопло, которое, в свою очередь, является разновидностью сопла Лаваля и имеет простую конструкцию и небольшую массу, а также шевронное сопло из материала с памятью формы.

Библиографический список

1. Сосунов, В.А., Чепкин, В.М. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. МАИ, 2003. 688 с.

2. 49-е совещание AIAA по аэрокосмическим наукам – Орландо, Флорида. Том: AIAA-2011-0226.

3. Алексенцев, А.А., Бекурин, Д.Б., Власов, Е.В., Иноземцев, А.А., Лаврухин, Г.Н., Падучев, А.П., Умпелева, О.А. Исследование характеристик сопла ТРДД с регулируемыми шевронами // Ученые записки ЦАГИ – 2009. – Том XL, – № 6. – С. 14–21.

4. Патент RU2530197C2, 10.10.2014. Встроенный привод механизма реверса тяги и привод вентиляторного сопла с изменяемым сечением / Джонс Тедди Л.

5. Патент RU2063534C1, 10.07.1996. Способ изготовления реактивного сопла второго контура двухконтурного газотурбинного двигателя / Б.Д. Фишбейн, Л.С. Абаимов.

6. Патент RU2479737C2, 20.04.2013. Регулируемое сопло вентилятора и двухконтурный турбореактивный двигатель / Дэльфин Эдит ДИЖУ, Бенуа Марк Мишель Фовеле, Тома Ален Кристиан Венсан.

© Иванов Н.Е., 2024

УДК 621.89.097.3

К.А. КАРЯКИН
kerinde@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Б.К. ГАЛИМХАНОВ
Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВДОЛЬ СЕКЦИИ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ С УЧЕТОМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация: статья знакомит с исследованием в области теплового расчета секции жаровой трубы.

Ключевые слова: камера сгорания; жаровая труба; математическое моделирование; гидрогазодинамика; тепловой расчет.

Одним из важных аспектов при проектировании воздушно реактивного двигателя (ВРД) является рациональная организация функционирования системы охлаждения камеры сгорания (КС). Только обеспечив необходимый температурный режим элементов конструкции КС, определяющих ресурс двигателя в целом, можно реализовать стабильный и наиболее эффективный рабочий процесс в двигателе на всей траектории полета. Для оптимизации параметров системы охлаждения на этапе проектирования целесообразно использовать тепловой расчет с учетом применяемой системы охлаждения. Расчеты целесообразно проводить с использованием метода конечных элементов, в частности программы *ANSYS*. В данной работе оценивается температурное состояние стенок жаровой трубы (ЖТ), их напряженно-деформированное состояние.

В основе используемого уравнения теплового баланса лежит предположение, которое считается достаточно хорошо теоретически обоснованным, хорошо согласуется с экспериментальными данными и широко используется как методическая основа при выполнении детальных расчетов с использованием *CAE*-пакетов вычислительной газодинамики. Так предполагается, что вся масса топлива сгорает на стехиометрических площадках (микроучастках) с локальными коэффициентами избытка воздуха, совокупность которых образует некоторую зону химических реакций. Между этими участками находятся микрообъемы балластного воздуха, который в химических реакциях участия не принимает, но после их завершения быстро перемешивается с образовавшимися, так называемыми, «чистыми продуктами сгорания».

Определение основных размеров и характеристик камеры сгорания ГТД заканчивается выполнением компоновочного чертежа проектируемой камеры сгорания. При этом её облик по основным геометрическим параметрам сопоставляется с камерой сгорания-прототипом и, при необходимости, уточняется при последующей проработке проекта. Из этого становятся также известными основные продольные и диаметральные размеры проточной части камеры сгорания, а также протяженности зоны горения, зоны смешения и относительные площади отверстий характерных зон для прохода воздуха внутрь жаровой трубы. Так же для дальнейшего расчета понадобятся начальные данные: температура, давление и скорость (на входе в КС и выходе из КС).

Применяются следующие пункты для расчета среднемассовой температуры газа по длине жаровой трубы:

1. Определение исходных теплофизических данных:

– расчет величины теплового эффекта горения и коэффициента полноты тепловыделения;

– определение средних величин теплоемкостей воздуха и продуктов сгорания.

2. Составление уравнения теплового баланса для определения $T_ж$.

3. Расчет среднемассовой температуры газа по участкам жаровой трубы.

Так же расчет целесообразно провести с использованием метода конечных элементов, в частности программы ANSYS.

В тепловой расчет входят:

1. Нагрев и охлаждение детали за счет:

– конвективного теплообмена;

– излучения.

2. Теплопередача в детали.

На основе результатов расчёта геометрическая и сеточная модели.

На рис. 1 представлена камера сгорания кольцевого типа. Данный тип КС широко применяется на двигателях 4, 5 поколений.

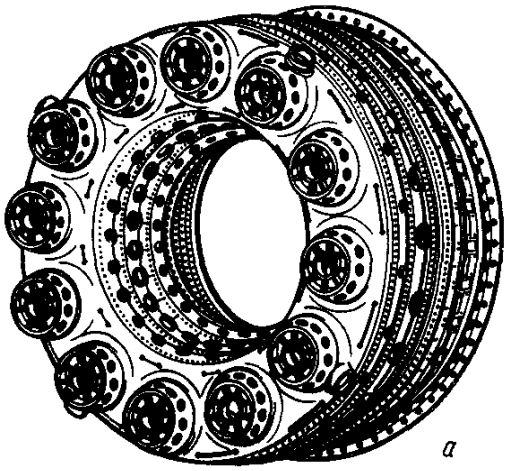


Рис. 1. Камера сгорания кольцевого типа

На рис. 2 представлен пример геометрической модели КС для дальнейшего построения сетки и расчета по секторам. Так же для более точного расчета КС можно разделить на секции и в дальнейшем проводить расчет на секционном уровне.

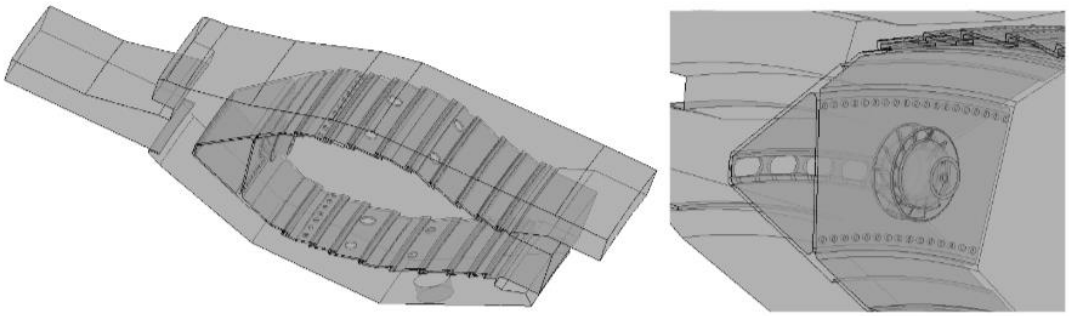


Рис. 2. Пример геометрической модели КС

На рис. 3 представлен пример уже построенной сеточной модели КС для дальнейшего расчета теплового состояния.

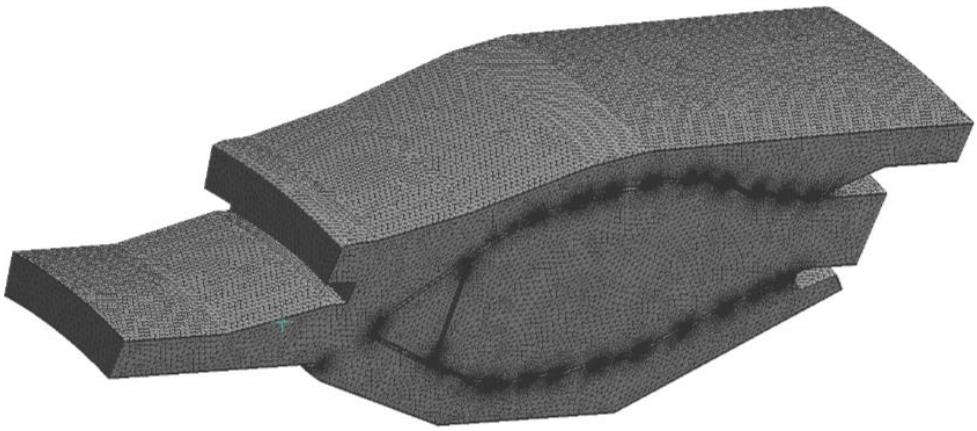


Рис. 3. Пример сеточной модели КС

На рис. 4 представлен пример расчетной модели теплового расчета при распределении на секции.

Исходные данные: температуры, давления и скорости (на входе в КС и выходе из КС); условие цикличности.

На основе полученных расчетных моделей возможно получить поля температур работы ЖТ (рис. 5). Видно, что толщина охлаждения равномерно увеличивается по длине камеры сгорания.

В заключение хотелось бы указать, что была составлена последовательность расчета, и на основе полученных результатов появляется возможность повысить точность теплового расчета с учетом охлаждения камеры сгорания ВРД.

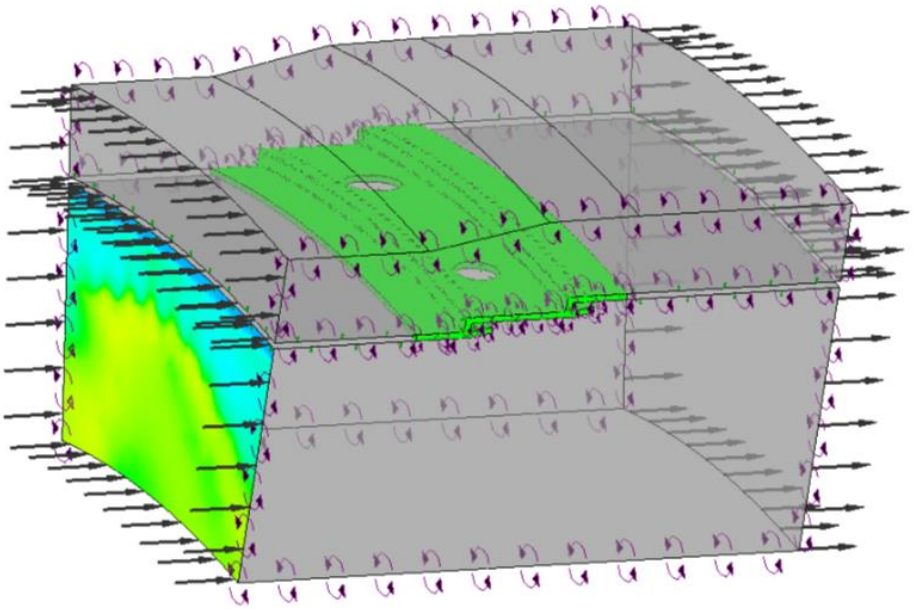


Рис. 4. Расчетная модель секционного теплового расчета

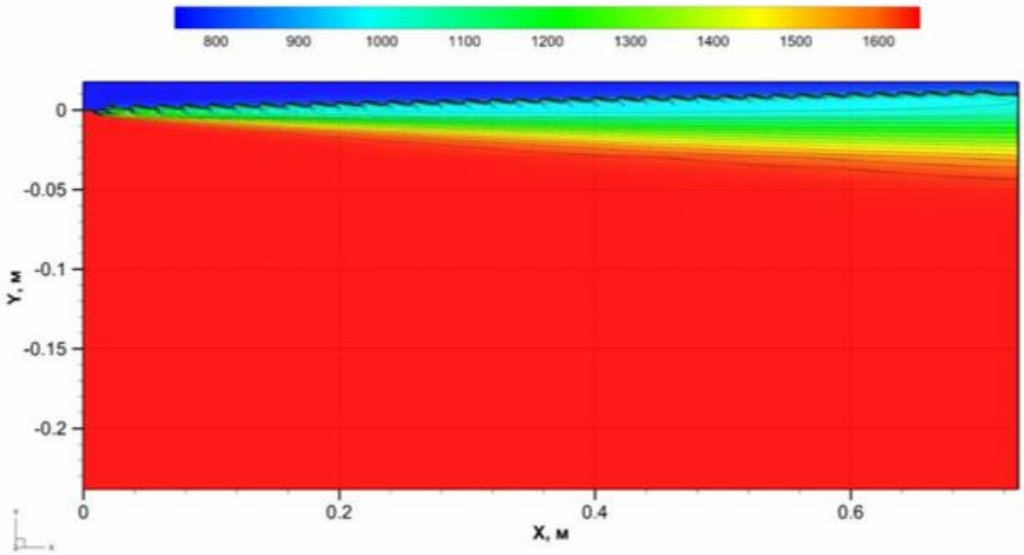


Рис. 5. Поля температур работы ЖТ

Биографический список

1. Диденко, А.А. Теория и расчет камер сгорания ВРД. Часть III. Тепловой и гидравлический расчеты камер сгорания ГТД. Самара 2012.

2. Копелев, С.З., Гуров, С.В. Тепловое состояние элементов конструкции авиационных двигателей. М., Машиностроение, 1978.

© Карякин К.А., 2024

УДК 621.89.097.3

Р.Р. АХТЯМОВ

ahri@kdax.ru
Науч. руководов. – доктор техн. наук, проф. И.А. КРИВОШЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ВЕРИФИКАЦИЯ ДИАГРАММ СМИТА ДЛЯ КОМПРЕССОРОВ

Аннотация: в настоящее время существуют зависимости коэффициента напора $\bar{H}$ от скоростного напора $\bar{c_a}$ с нанесёнными на график изолиниями КПД ступени компрессора, называемые диаграммами Смита. В данной статье будут рассмотрены различные экспериментальные зависимости, приведено сравнение параметров по высоте проточной части ступени *NASA Stage* 37 (3 сечения: втулочное; среднее; периферийное) с результатами вышеупомянутых экспериментов.
Ключевые слова: диаграмма Смита; осевой компрессор; КПД компрессора; степень реактивности; коэффициент напора; скоростной напор; ступень компрессора; *NASA Stage* 37.

Рассмотрим первую зависимость: коэффициент напора от степени реактивности при различных скоростных напорах при густоте решётки *b/t* = 1,0 [1]. Для начала перестроим данную зависимость в координаты диаграммы Смита (рис. 1, *а*, *б*). Наложив полученные ветки зависимостей для степени реактивности 0,5, 0,7 и 0,9 на диаграммы [3], увидим, что при постоянных степенях реактивности ρ точки зависимости находятся близко к точкам, где КПД при заданном скоростном напоре максимальный. Отметим, что КПД при степени реактивности 0,5 больше, чем при степени реактивности равной 0,9, что в целом соответствует известным данным.

Рассмотрим следующую зависимость: КПД элементарной ступени в зависимости от скоростного напора и степени реактивности при густоте решётки *b/t* = 1,0 [2]. Перестроив данную зависимость, мы получим картину, похожую на диаграмму Смита (рис. 1, *в*, *г*), однако с сильно завышенными значениями коэффициента напора.

Нанесём точки, снятые с зависимости (рис. 1, *д*), на диаграммы Смита (рис. 2–4). Точки, взятые с зависимости, для скоростного напора равного 0,5 и 0,6 сильно выбиваются из общей картины, однако для скоростного напора равного 0,7 точка приблизительно попадает в значения диаграммы Смита. Точки зависимости (рис. 1, *д*) взяты для густоты решётки *b/t* = 1,0. Отметим, что точки со скоростным напором 0,5 и 0,6 хорошо согласуются с перестроенной зависимостью на рис. 1, *г*.

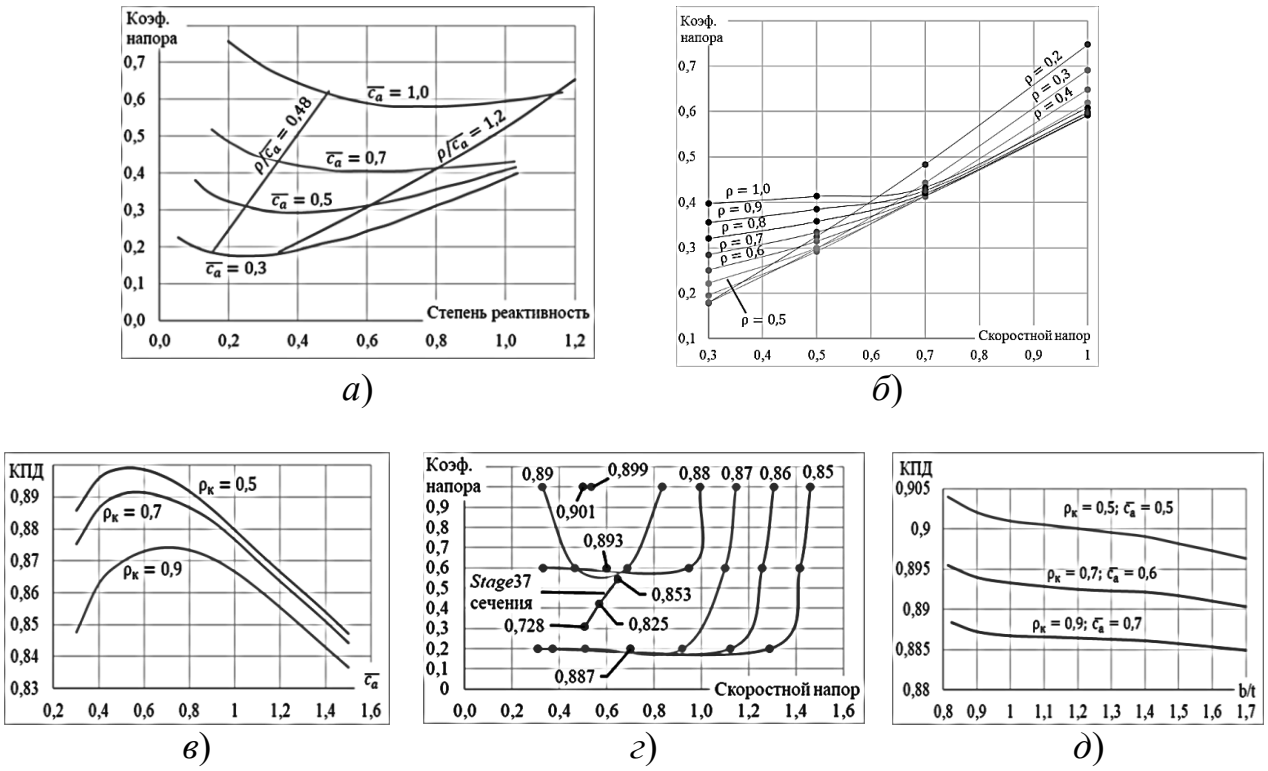


Рис. 1. Зависимости КПД от различных параметров:
а) – зависимость коэффициента напора от степени реактивности при различных скоростных напорах при густоте решётки *b/t* = 1,0; *б*) – зависимость «а», перестроенная в координатах диаграммы Смита; *в*) – зависимость КПД элементарной ступени в зависимости от скоростного напора и степени реактивности при густоте решётки *b/t* = 1,0; *г*) – зависимость «в», перестроенная в координатах диаграммы Смита; *д*) – зависимость КПД от густоты решётки при различных скоростных напорах и степени реактивности

Проверим точку ступени *NASA Stage* 37. Для этого проведём 3*D*-расчёт в программном комплексе *ANSYS* 2024 *R*2.02 в модуле *CFX*. Для этого создана расчётная модель. Геометрия лопатки рабочего колеса взята из демонстрационных материалов модуля *TurboGrid*, направляющего аппарата построена в модуле *BladeGen* по имеющимся данным. Сетка рабочего колеса (РК) состоит из 7,48 млн конечных элементов, направляющего аппарата (НА) из 8,87 млн конечных элементов, суммарно 16,35 млн конечных элементов. Заданы граничные условия на входе в виде полного давления и температуры. На выходе из направляющего аппарата задано статическое давление. Способ передачи информации из РК в НА *Stage (Mixing-Plane)* с осреднением по давлению. Для значения $y^+ < 5$ выбрана модель турбулентности *Shear Stress Transport (SST)*. Полученные результаты численного моделирования имеют хорошую корреляцию с результатами других исследований. Несмотря на неточности в методах расчёта в *CFX*, можно с допустимой точностью получать решения поставленных задач.

В результате получено: коэффициент напора 0,416, скоростной напор 0,564, изоэнтропический КПД 82,6%. Построены зависимости распределения КПД и степени реактивности по относительной высоте (рис. 2).

Отклонение параметров для ступени *NASA Stage 37* приблизительно одинаково на всех трёх диаграммах и составляет ≈ 9,6%. Полученные параметры лучше согласуются с зависимостью на рис. 1, *г*.

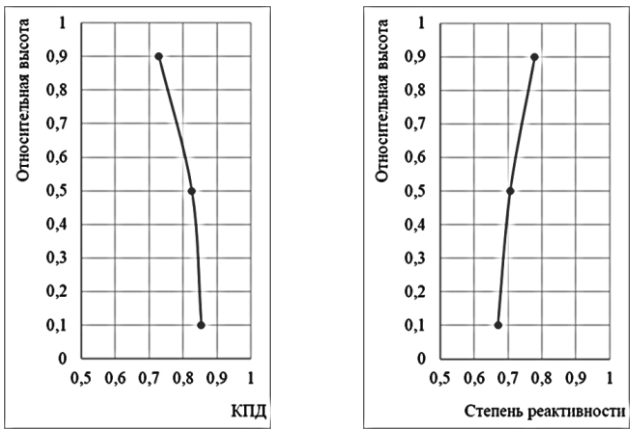


Рис. 2. Зависимость КПД и степени реактивности по высоте проточной части *NASA Stage* 37

Расположим на диаграмме параметры ступеней *NASA Stage* 35, 36, 38, взятые из технической справки *NASA* [4]. Параметры имеют аналогичное расхождение с диаграммой, как представленная выше ступень *Stage* 37 в *ANSYS CFX*. Нанесём большое количество точек (отмечены «кружками» на рис. 3–5), полученные из различных отчётов [5] для отечественных двигателей, на диаграммы Смита. Сравнив значение КПД на диаграмме и известное КПД в данной точке (табл. 1), увидим, что большинство точек совпадают со значениями КПД хотя бы на одной из представленных диаграмм.

Таблица 1

Точки отечественных двигателей на диаграмме Смита

$\bar{c}_a$	$\bar{H}$	КПД	КПД на диаграмме ρ = 0,5	КПД на диаграмме ρ = 0,7	КПД на диаграмме ρ = 0,9
0,44	0,19	0,91	0,91-0,92	0,90-0,91	0,88
0,50	0,34	0,928	0,91-0,92	0,91-0,92	≥0,91
0,49	0,27	0,903	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,43	0,21	0,909	≥0,92	0,91-0,92	0,89-0,90
0,49	0,26	0,901	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,47	0,26	0,901	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,48	0,26	0,9	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,51	0,29	0,907	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,54	0,32	0,907	≥0,92	0,91-0,92	≥0,91
0,58	0,34	0,908	0,91-0,92	0,91-0,92	≥0,91
0,52	0,29	0,917	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91

Окончание таблицы 1

0,52	0,31	0,915	≥0,92	0,91-0,92	≥0,91
0,52	0,29	0,907	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,54	0,30	0,911	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,50	0,27	0,911	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,54	0,29	0,924	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,53	0,29	0,920	≥0,92	0,91-0,92	0,90-0,91
0,37	0,42	0,887	0,87-0,88	0,88-0,90	0,90-0,91
0,35	0,40	0,88	0,87-0,88	0,88-0,90	0,90-0,91

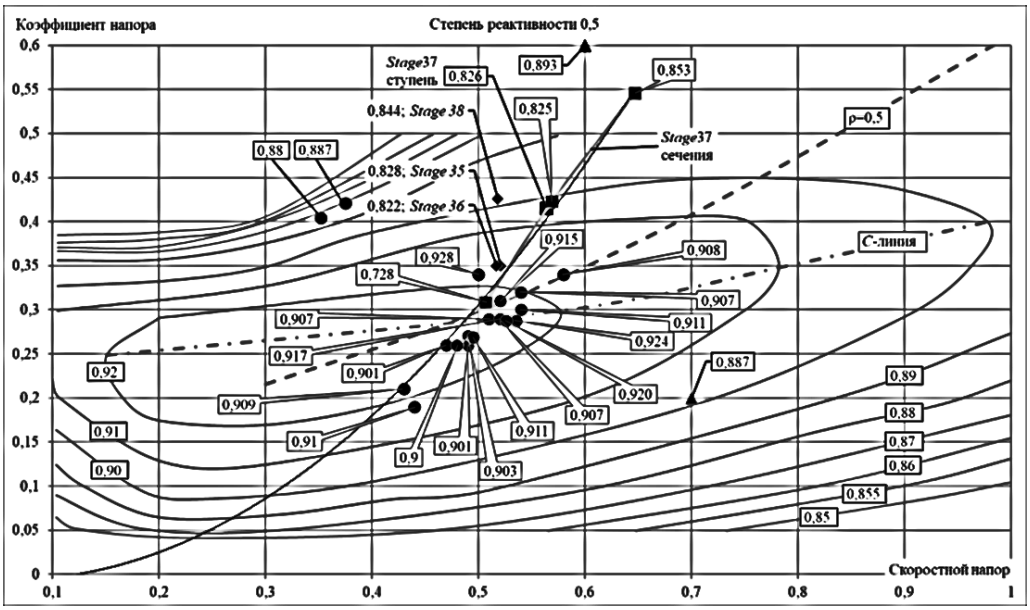


Рис. 3. Диаграмма Смита с нанесённой на неё зависимостью (ρ = 0,5)

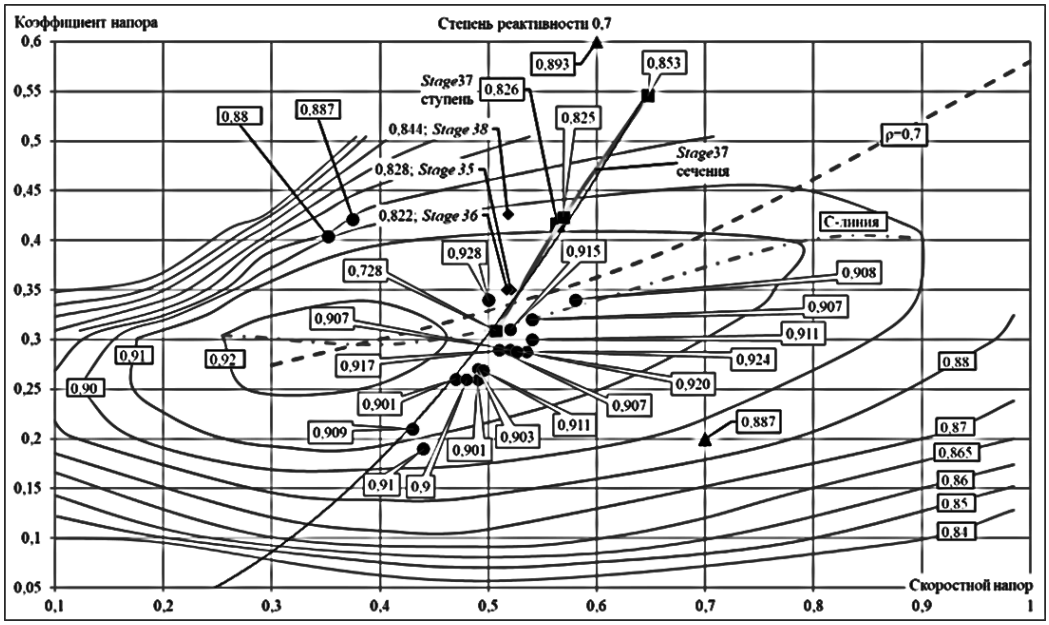


Рис. 4. Диаграмма Смита с нанесённой на неё зависимостью (ρ = 0,7)

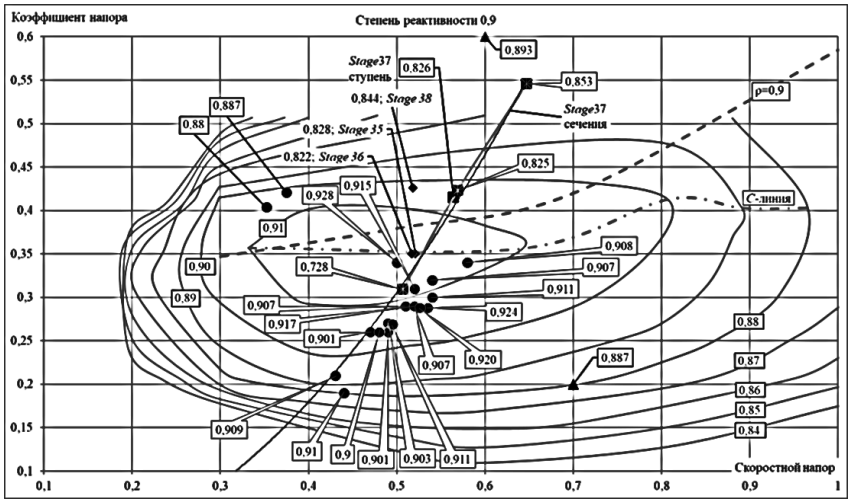


Рис. 5. Диаграмма Смита с нанесённой на неё зависимостью (ρ = 0,9)

Расхождение параметров, снятых с зависимостей (см. рис. 1) [1;2] и полученных в результате расчёта в *Ansys CFX*, с диаграммами Смита можно объяснить тем фактом, что отсутствует информация для каких густот решёток, относительных диаметров втулок, какую окружную скорость брали для расчёта скоростного напора и коэффициента нагрузки, размеров проточной части были построены эти диаграммы. При этом же достаточно хорошо согласуются параметры ступеней современных отечественных двигателей с диаграммами. Этим фактом и обуславливается необходимость построения своих диаграмм Смита с учётом современного достигнутого уровня.

Библиографический список

1. Мамиконов, А.Г., Ерохин, А.П., Предтеченский, Г.И. Теория авиационных компрессоров и газовых турбин. – Ленинград, Типолитография ЛКВВИА им. А.Ф. Можайского, 1961 г., 422 с.

2. Холщевников, К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – Москва, Издательство «Машиностроение», 1970 г., 610 с.

3. *Lewis, R.I. Turbomachinery performance analysis*. – *Publisher*: *Elsevier Science* & *Technology Books*, 1996 y., 328 p.

4. *Lonnie Reid., Royce D. Moore. NASA Technical Paper* 1337. *Design and overall performance of four highly loaded, high-speed inlet stages for an advanced high-pressure core compressor. Publisher: National aeronautics and space administration – Cleveland, Obio*, 1978 *y*., 119 *p*.

5. Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». – Москва, ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2015 г., 1133 с

© Ахтямов Р.Р., 2024

УДК 621.452.3

В.Н. БАЙБУРИН, А.Д. ХАНМУРЗИН
baiburin.vadim@mail.ru, x4n-art@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. М.А. МУРАЕВА

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКА-ИСПАРИТЕЛЯ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГТД НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

Аннотация: представляемая работа посвящена начальному этапу моделирования рабочего процесса двигателя на водородном топливе, а именно: выбору и анализу программного обеспечения, а также термодинамическому моделированию двигателя на водородном топливе, в том числе анализу влияния места положения теплообменника-испарителя на параметры газотурбинного двигателя (ГТД).
Ключевые слова: ГТД; криогенное топливо; водородное топливо; теплообменник-испаритель.

Согласно ряду экспертных мнений ведущих специалистов, в области газотурбостроения, в настоящее время параметры газотурбинного двигателя (ГТД), характеризующие эффективность его работы, близки к пределу улучшения, в связи с чем дальнейшее совершенствование ГТД возможно за счет кардинальных изменений в его рабочем процессе, одним из путей этого изменения является применение криогенных топлив. В работе рассматривается мировой опыт и перспективы применения сжиженного водорода в качестве топлива для ГТД.

Помимо обеспечения скачка в параметрах ГТД, актуальность применения водорода в качестве топлива обусловлена ограниченностью углеводородных источников энергии и негативным влиянием традиционных топлив на окружающую среду. Ряд крупных производителей наземных газотурбинных установок в той или иной степени занимается разработкой новых установок на водородсодержащем топливе или переводом на него существующих [1]. Исследования применения водородного топлива для авиационных ГТД так же проводятся, однако их существенно меньше [2].

Цель текущей работы: оценка влияния места расположения теплообменника-испарителя на параметры двигателя.

Задачи:

– выбрать программный продукт и доработать его для термодинамических расчетов двигателя на водородном топливе;

– выбрать наиболее целесообразное место расположения теплообменника-испарителя и произвести последующий анализ и сравнение результатов.

Мировой опыт создания ГТД на водородном топливе.

Ключевым проектом в изучаемом вопросе является советская разработка летающей лаборатории Ту-155, в состав силовой установки которой входил двигатель НК-88, работавший на сжиженном водороде. Интерес к теме существует и в настоящее время, далеко не единственным примером служит проект Rolls-Royce и easyJet: был осуществлён наземный запуск авиационного двигателя, работающего на водороде [3]. Особую нишу водородное топливо занимает в наземном газотурбостроении: для улучшения эмиссионных характеристик в качестве топлива используется смесь метана и водорода.

Достоинства и перспективы применения водородного топлива.

Перспективы развития водородного двигателя основываются на многочисленных достоинствах водородного топлива: уменьшение удельного расхода топлива; увеличение дальности полета; экологическая чистота топлива; высокая химическая активность; высокое хладосодержание; устойчивость к ценам на нефть; водород является возобновляемым источником энергии; развитие новых технологий.

Проблемы, связанные с применением водородного топлива.

Разработка и интеграция водородных систем в авиацию требуют значительной технической экспертизы и инженерных исследований ввиду следующих серьезных проблем: необходимость содержания водорода при экстремально низких температурах; высокая пожаро- и взрывоопасность; большая себестоимость производства водорода; необходимость создания новых камер сгорания (КС) и новых систем топливоподачи и регулирования ГТД.

Конструктивная схема двигателя на водородном топливе и особенности рабочего процесса.

Конструктивная схема двигателя на водородном топливе (рис. 1) принципиально не отличается от схемы двигателя на керосине. Изменения претерпевает конструкция камеры сгорания, топливной системы, системы регулирования. При проектировании двигателя и систем следует учитывать крайне низкую температуру жидкого водорода (13 К), его низкую температуру кипения (21 К), высокую летучесть и химическую активность.

При работе с двигателем НК-88 встал вопрос об агрегатном состоянии водорода, подаваемого в КС. Подача жидкого водорода представляет большую трудность, поскольку в данном случае необходима идеальная тепловая изоляция трубопроводов от насоса к камере сгорания, при малейшем нарушении которой жидкий водород будет сразу переходить в газообразный. Но даже при идеальной тепловой изоляции трубопроводов всегда имеет место небольшая окружная неравномерность температуры потока воздуха от компрессора на входе в камеру сгорания (ΔT = 5…8 °С), при этом жидкий водород, поступающий в форсунки, расположенные по окружности, может

нагреваться в разных форсунках по-разному и находиться в различных фазовых состояниях. Это может привести к неравномерной подаче водорода через форсунки, пульсации расхода и давления и большой неравномерности температурного поля перед турбиной. Исключить фазовые превращения водорода можно за счет создания больших давлений на всех режимах работы двигателя, но это приведет к повышенным требованиям к насосам. Поэтому предпочтительной является схема с газификацией водорода в теплообменном аппарате, месторасположение которого является немаловажным вопросом [4].

В двигателе НК-88 теплообменник-испаритель установлен за турбиной. В нем происходит газификация топлива, которое затем подается в камеру сгорания в газообразном состоянии. При этом хладоресурс топлива используется для повышения эффективности цикла.

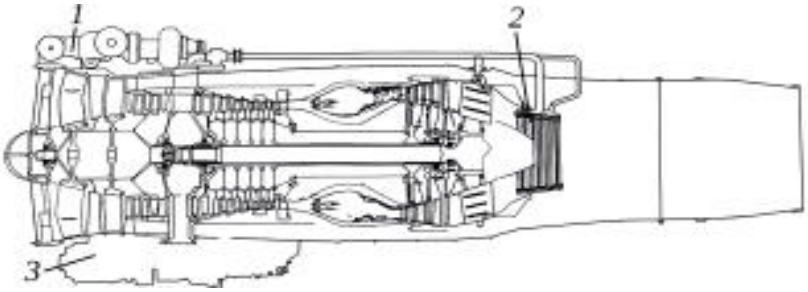


Рис. 1. Схема двигателя НК-88 [5]: *1* – криогенный насосный агрегат; *2* – теплообменник-газификатор; *3* – коробка приводов вспомогательных агрегатов

Система газификации криогенного топлива должна обеспечивать оптимальный режим работы с минимальным удельным расходом топлива, максимальным подогревом, отсутствием обмерзания, высокой гидродинамической устойчивостью.

Программный комплекс для термодинамического расчета.

Для моделирования рабочего процесса двигателя на водородном топливе был выбран программный комплекс DWIGwT ввиду возможности работы по модульному принципу и выбора схемы любой конфигурации.

GasTurb имеет изначально заложенные схемы ГТД, что делает невозможным дальнейшую работу при данной поставленной задаче проработки разных мест установки теплообменника-испарителя.

Модуль теплообменника-испарителя.

Авторами работы разработан модуль теплообменника-испарителя водорода на основе модуля для сжиженного природного газа (СПГ), в котором заменены свойства рабочего тела на свойства водорода.

Из справочника Варгафтика [6] взяты зависимости удельного объема, энтальпии, энтропии и теплоемкости от давления на линии насыщения и в диапазоне температур и давлений.

Выбор места расположения теплообменника.

Авторами работы на основе термодинамических расчетов проведено исследование влияния места расположения теплообменника (ТО) на параметры двигателя.

В качестве объекта исследования принят двигатель ПД-14, который располагается на самолете МС-21-300. Анализируются две схемы расположения теплообменника: на пути подвода охлаждающего воздуха, отбираемого из-за компрессора высокого давления (КВД), в турбину высокого давления (ТВД) (рис. 2) и за турбиной низкого давления (ТНД) (рис. 3).

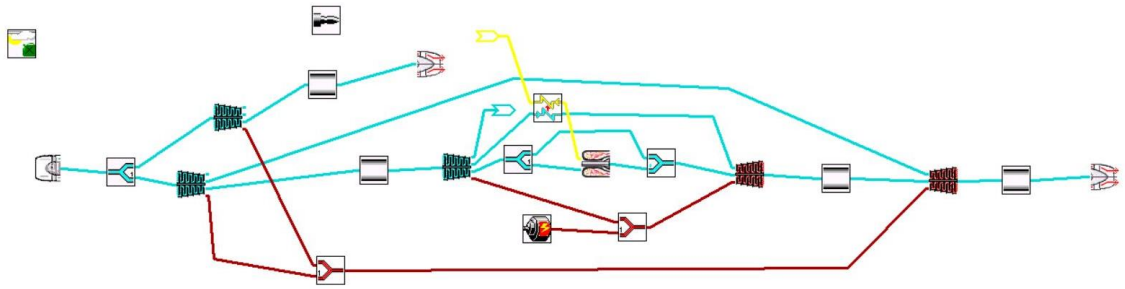


Рис. 2. Схема двигателя с теплообменником на линии охлаждения ТВД

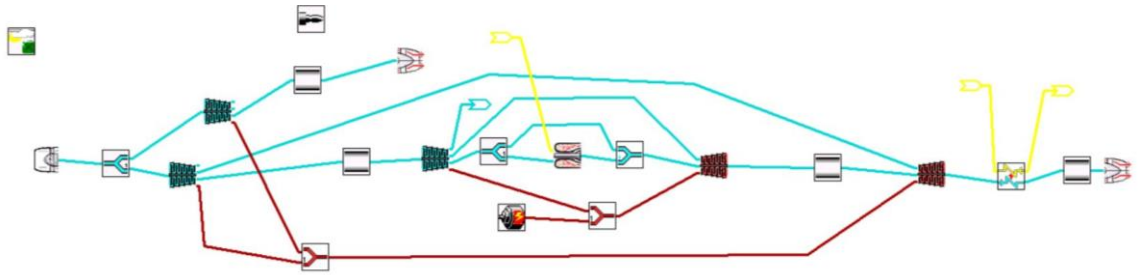


Рис. 3. Схема двигателя с теплообменником за ТНД

Параметры двигателя на водородном топливе сравнивались с параметрами двигателя на керосине. Проведен сравнительный анализ следующих параметров (табл. 1): тяги двигателя (P); температуры газа на выходе из камеры сгорания (КС) ($T_г$*); удельного расхода топлива ($C_{уд}$); расхода охлаждающего воздуха ($G_{охл\ твд}$).

Анализ полученных параметров показал, что двигатель на водородном топливе без теплообменника в сравнении с двигателем на керосине без изменения температуры газа дает выигрыш в тяге на 5,2%. Если обеспечить тягу двигателя на водородном топливе как у двигателя на керосине, выигрыш в удельном расходе топлива составит 64,38%. Если поставить теплообменник за ТНД при сохранении тяги, то удельный расход топлива вырастает в сравнении с двигателем без теплообменника на 64,32%. При установке теплообменника на

линии охлаждения и выдерживания тяги как у двигателя на керосине, температура газа и удельный расход в сравнении с двигателем на керосине уменьшились на 3,21% и 64,48% соответственно, а в сравнении с двигателем на водороде с теплообменником за ТНД параметры уменьшились на 1,2% и 0,5% соответственно.

Таблица 1

Сравнительный анализ параметров

	$T_г$*, К	P, кН	$C_{уд}$, кг/(кН*ч)	$G_{охл\ твд}$
Двигатель на керосине	1542	24,6028	54,8709	13,8
Двигатель на водороде	1542	25,8815	19,6793	13,8
Двигатель на водороде без ТО и с тягой как у керосина	1504	24,6111	19,5456	13,8
Двигатель на водороде с ТО за ТНД и тягой как у керосина	1510,5	24,6059	19,5802	13,8
Двигатель на водороде с ТО за КВД на линии охлаждения	1542	25,9902	19,611	12,8
Двигатель на водороде с ТО за КВД на линии охлаждения и тягой как у керосина	1492,8	24,603	19,4915	11,82

В данной работе выбран программный продукт для термодинамических расчетов двигателя на водородном топливе, с применением DWIGwT проведен анализ влияния места расположения теплообменника-испарителя на параметры ГТД. Были выявлены преимущества водородного двигателя:

– при установке теплообменника за ТНД и сохранении тяги выигрыш в удельном расходе топлива по сравнению с двигателем на керосине составляет 64,32%;

– при установке теплообменника на линии охлаждения и сохранении тяги выигрыш в удельном расходе топлива по сравнению с двигателем на керосине составляет 64,48%.

На основе проделанной работы можно сделать вывод, что авиационные двигатели на водороде представляют большой потенциал для развития двигателестроения в будущем. Однако, для его широкого внедрения необходимо решить множество технических, экономических и инфраструктурных проблем. Поэтому необходимо продолжить исследования в таких направлениях, как облик теплообменника, камера сгорания, эмиссия и анализ водородных двигателей. Впоследствии это может привести к новым открытиям и инновациям, которые в будущем откроют новые возможности для улучшения производительности и увеличения области применения водородных двигателей.

Библиографический список

1. Семенов С.В. Обзор исследований и разработок по газотурбинным энергетическим установкам на водородном топливе / Нихамкин М.Ш., Плотников А.И // Авиационные двигатели. – 2022. – №3 (16). – С. 77–79.

2. Энергия завтрашнего дня: создание и будущее водородного двигателя [Электронный ресурс]. – URL: https://dzen.ru/a/YOQcoUXSQwPsGlOi (дата обращения 20.10.2023).

3. Rolls-Royce и easyJet успешно испытали авиационный двигатель на водороде [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ixbt.com/news/2022/11/28/rolls-royce-easyjet.html (дата обращения 20.10.2023).

4. Орлов, В.Н. Системы топливопитания и регулирования авиационных ГТД на криогенном топливе / Е.В. Шахматов, А.И. Иванов, И.П. Косицын, В.А. Букин, А.Г. Гимадиев. // Электронное учебное пособие. – Самара, 2013. – С. 173–179.

5. Зрелов, В.А. Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы // М.: «Машиностроение, 2005. – 334 стр.

4. Оружие массового поражения [Электронный ресурс]. – URL: https://mass-destruction-weapon.blogspot.com/2020/09/agm-28-hound-dog.html (дата обращения 20.10.2023).

6. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. // Издательство «наука» – 1972 г.

© Байбурин В.Н., Ханмурзин А.Д., 2024

УДК 621.452.3

С.А. КАСЬЯНОВ
stas.kasyanov.2002@mail.ru
Науч. руководитель – докт. техн. наук, проф. И.А. КРИВОШЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИТОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОРПУСА

Аннотация: в статье приведен процесс разработки конструкции литого промежуточного корпуса двухконтурного турбореактивного двигателя с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ). Приведены преимущества над сварными конструкциями.
Ключевые слова: крупногабаритное литье; промежуточный корпус; газодинамическая доводка; сварка.

Промежуточный корпус (ПК) устанавливается между компрессорами газотурбинного двигателя (ГТД) и содержит конструктивные элементы,

которые обеспечивают сохранение силовой схемы двигателя, а также непрерывное течение рабочего тела вдоль тракта ГТД (рис. 1).

В большинстве ГТД промежуточный корпус используется также для размещения приводов агрегатов и коммуникаций систем двигателя.

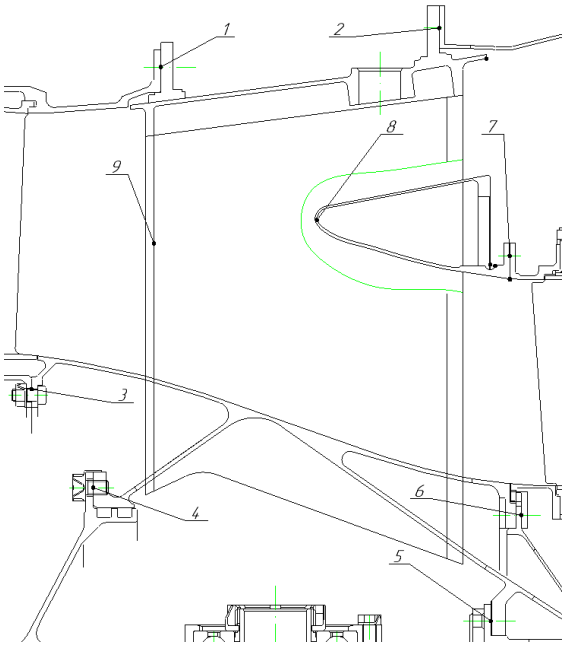


Рис. 1. Типичный вид промежуточного корпуса ТРДДФ

Промежуточный корпус содержит в себе: элементы крепления 1–7, обеспечивающие силовую связь статора двигателя с корпусами опор; разделитель потоков 8, обеспечивающий разделение потоков внутреннего и наружного контуров: полые силовые стойки 9, обеспечивающие общую жесткость конструкции и позволяющие проводить различные коммуникации.

В проектируемой конструкции необходимо обеспечить проведение следующих видов коммуникаций:

1) суфлирование предмасляных полостей задней опоры компрессора низкого давления (КНД) и передней опоры компрессора высокого давления (КВД);
2) трубопровод подвода масла задней опоры КНД, передней опоры КВД и центральной конической передачи (ЦКП);
3) трубопровод откачки масла из полости промежуточного корпуса;
4) сброс воздуха из думисной полости КНД;
5) рессора привода нижнего откачивающего маслонасоса ЦКП;
6) наддув воздуха уплотнений опор КНД и КВД;
7) рессора привода редуктора датчиков ротора низкого давления (РНД);
8) рессора ЦКП и суфлирование масляной полости промежуточного корпуса.

Вид и конфигурация фланцев для всех видов коммуникаций будут взяты с двигателя-прототипа в целях унификации производства.

Для соблюдения условий отливки все радиусы скруглений выполняются не менее 4 мм.

Литой корпус в сравнении со сварным позволяет: получить более равномерные свойства по всему объему; сократить производственный цикл; повысить экономичность производства вследствие увеличения коэффициента использования материала.

Выбор формы проточной части каналов внутреннего и наружного контуров.

Методики для расчета обвода промежуточных каналов не существует, изначальный вариант прорисовывается вручную, далее он уточняется с помощью газодинамических расчетов. Основные критерии при этом: коэффициенты потерь полного давления; распределение числа маха вдоль проточной части (д. б. без резких скачков); минимальная неоднородность полей давления на выходе.

Ограничиваясь диаметрами входа и выхода и минимальной длиной промежуточного корпуса было последовательно рассчитано и построено не менее 15 вариантов проточной части (ПЧ) ПК. Пример результата построения приведен на рисунке 2.

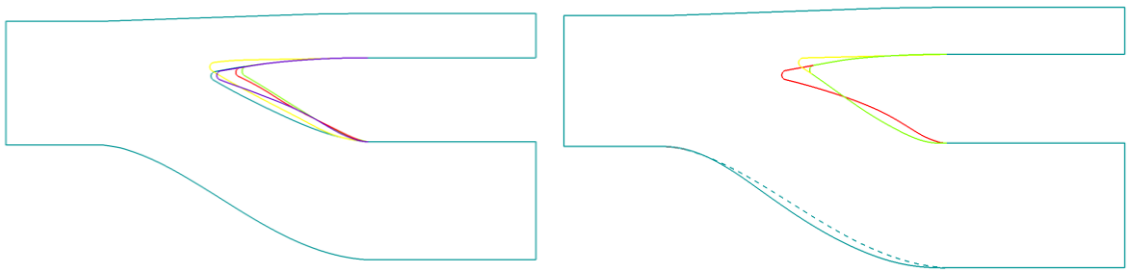


Рис. 2. Примеры построения обводов ПЧ ПК

При расчетах были заданы следующие граничные условия (ГУ):

1) ГУ «вход» – поле давлений на выходе из КНД;

2) ГУ «выход» – расход в соответствии со степенью двухконтурности;

3) рабочее тело – модель идеального газа (учтено влияние изменения вязкости, теплоемкости и теплопередачи).

В конструкции промежуточного корпуса применяются 3 вида стоек: толстые; средние; тонкие.

Выбор проточной части проводится с толстой стойкой, т.к. она хуже обтекается. После выбора наилучшей формы ПЧ расчет проводится с остальными видами стоек.

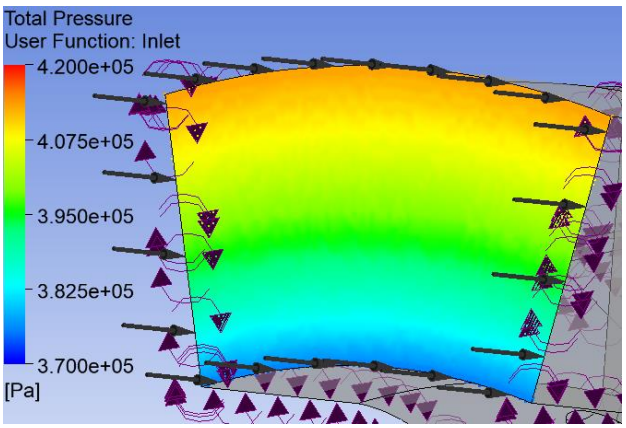


Рис. 3. Расчетная модель

По результатам расчетов выбран наилучший вариант проточной части промежуточного корпуса – он представлен на рис. 4–7.

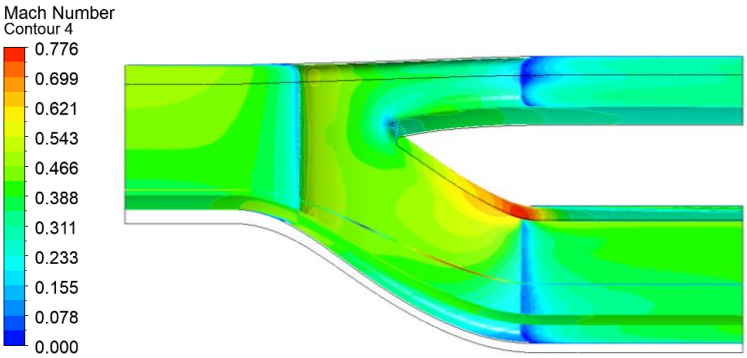


Рис. 4. Распределение числа маха в сечении ПЧ промежуточного корпуса, наилучшего варианта

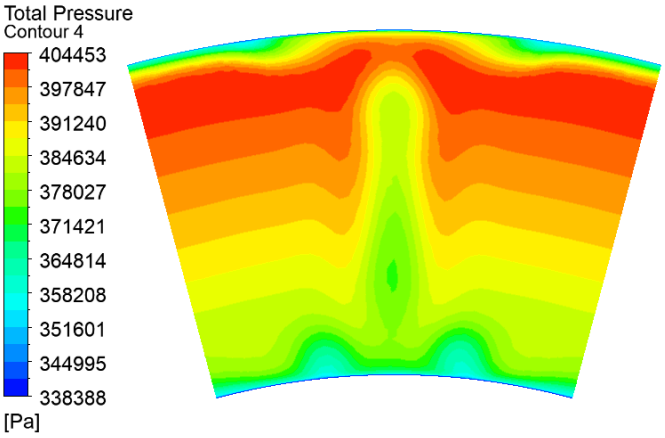


Рис. 5. Распределение полного давления во внутреннем контуре на выходе из промежуточного корпуса для толстой стойки

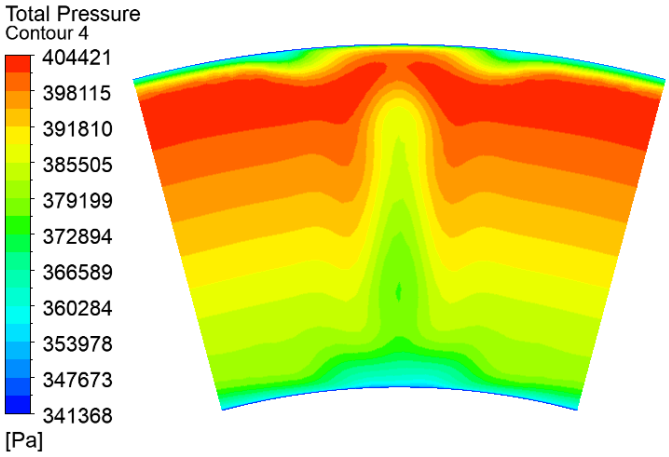


Рис. 6. Распределение полного давления во внутреннем контуре на выходе из промежуточного корпуса для средней стойки

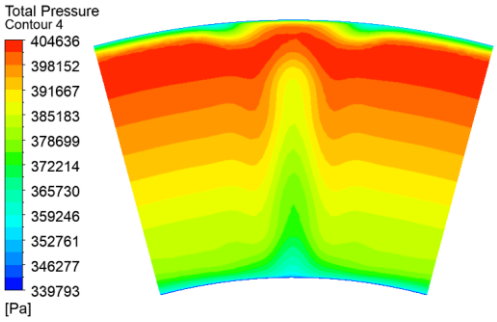


Рис. 7. Распределение полного давления во внутреннем контуре на выходе из промежуточного корпуса для тонкой стойки

По результатам расчета длина промежуточного корпуса составляет 240 мм, максимальный диаметр 920 мм. Потери полного давления рассчитываются для каждого вида стоек отдельно, но так как общее число стоек мало (12), и взаимное влияние их друг на друга можно исключить, общий коэффициент потерь полного давления можно найти как среднее арифметическое по всем видам стоек. В результате коэффициент потерь полного давления во внутреннем контуре составил 0,9945, во внешнем контуре 0,992. Данные результаты можно считать удовлетворительными.

Разработка конструкции промежуточного корпуса.

После выбора формы проточной части и габаритных размеров можно приступать к проработке конструкции промежуточного корпуса.

При разработке конструкции необходимо, в первую очередь, учитывать возможность изготовления (отливки) того или иного конструктивного решения, а также возможность размещения коммуникации двигателя прототипа.

В результате анализа конструкции двигателя-прототипа и учитывая опыт изготовления частично литого корпуса двигателя АЛ-55, была принята следующая схема (рис. 8).

В целях снижения массы была уменьшена длина фланцев элементов крепления, так как на проектируемом двигателе они являлись подкрепляющими элементами при вваривании стоек, в чем нет необходимости при литой конструкции.

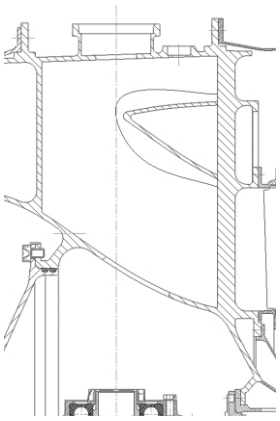


Рис. 8. Проектируемый литой промежуточный корпус

Также были размещены все необходимые элементы коммуникаций рис. 9– 10.

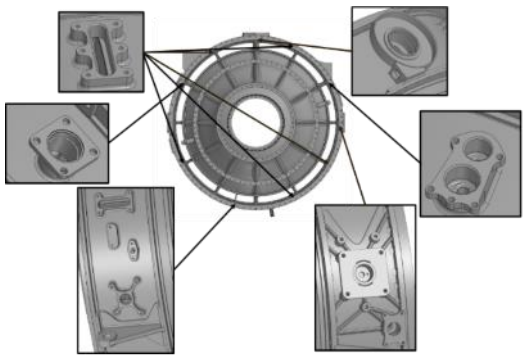


Рис. 9. Элементы коммуникаций, размещенные на корпусе

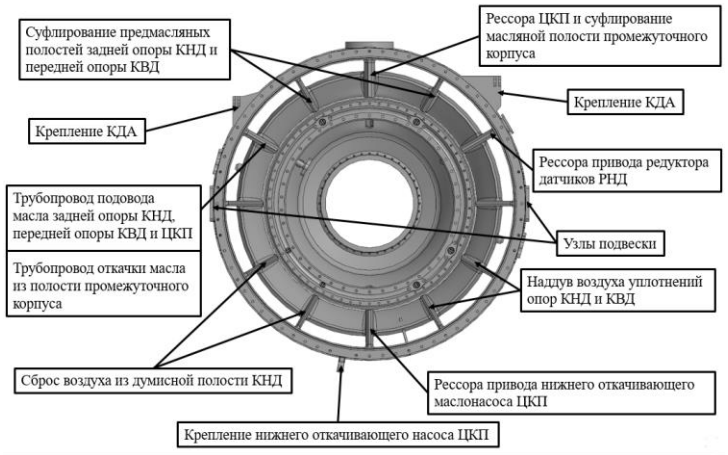


Рис. 10. Назначение элементов коммуникаций и креплений

На рисунке 11 представлена 3*D*-модель проектируемого промежуточного корпуса.

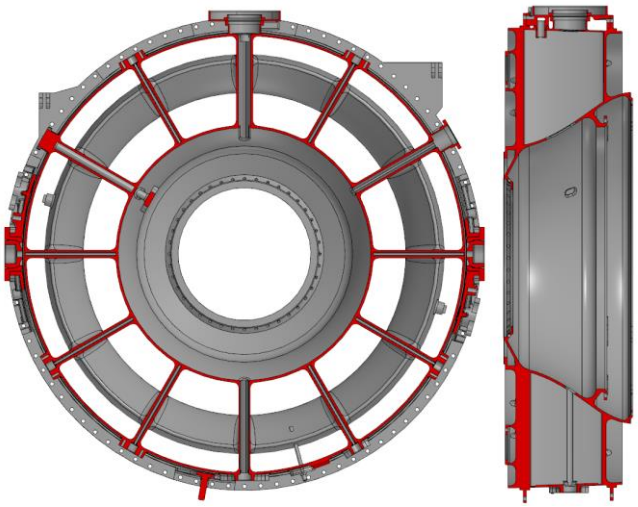


Рис. 11. Промежуточный корпус (виды в разрезе)

Материал корпуса титановый сплав ВТ20Л. Промежуточный корпус предполагается изготавливать литьем по выплавляемым моделям. В таком случае для обеспечения точности отливки внутренних полостей стоек в формах для отливки необходимо выполнить отверстия, затем на готовых отливках эти отверстия заварить.

Библиографический список

1.Фалалеев, С.В. Конструкция ТРДДФ АЛ-31Ф [Электронный ресурс]: электрон. учебное пособие. / С.В. Фалалеев; М-во образования и науки РФ, Самара, гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-т).

© Касьянов С.А., 2024

УДК 621.45.034

Ю.М. ЛУКИН
mr.lukinluk@mail.ru
Науч. руководов. – докт. техн. наук, проф. И.М. ГОРЮНОВ
Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ГТД

Аннотация: рассматривается процесс детонационного сжигания топлива как один из наиболее перспективных подходов к совершенствованию газотурбин-

ного двигателя. Приведена краткая теория по структуре распространения детонационной волны. Представлены обзор и анализ ГТД, использующих термодинамический цикл детонационного сжигания топлива. Рассмотрены двигатели различных схем и компоновок: импульсно-детонационные; ротационные; гибридные газотурбинные двигатели. Приведены примеры теоретических и экспериментальных работ по исследованию детонационных двигателей.
Ключевые слова: детонация; детонационный двигатель; детонационное сжигание топлива; ротационный детонационный двигатель; импульсно-детонационный двигатель; детонационная волна.

Дефлаграционное горение – это принцип работы большинства современных газотурбинных двигателей (ГТД): при постоянном давлении в камере сгорания сжигается топливо. Но для улучшения характеристик ГТД этого недостаточно. Необходимо постоянно совершенствовать конструкционные схемы, применять новые современные материалы, изучать быстро меняющиеся тенденции и подходы к проектированию газотурбинных двигателей и, в частности, камер сгорания.

Сейчас передовые исследовательские сообщества все больше обращают свое внимание на детонационное сжигание топлива как на наиболее перспективный и многообещающий подход к совершенствованию авиационного двигателя.

Детонация – это гидродинамический волновой процесс распространения по веществу зоны экзотермической реакции со сверхзвуковой скоростью [1].

Детонационная волна представляет собой два слоя: сильную ударную волну, которая распространяется по горючему газу, нагревая его до высокой температуры; и зону химической реакции, которая находится за фронтом волны. Химическая реакция газа протекает достаточно активно, с воспламенением и выделением теплоты, которая поддерживает ударную волну. Из этого следует, что ударная волна не может существовать без подведения энергии [2].

Согласно теории Д. Чепмена и Э. Жуге условие протекания детонации и стационарности ударной волны состоит в том, что приведенная скорость протекания химической реакции продуктов детонации относительно фронта ударной волны должна быть равна местной скорости звука. Детонационная волна, в свою очередь, распространяется с минимально возможной скоростью. Данная теория Д. Чепмена и Э. Жуге была многократно подтверждена экспериментально.

Дефлаграционное горение имеет довольно турбулентную границу фронта пламени, которая распространяется со скоростью 1-2 м/с, все изменения давления, связанные с нагреванием, сильно опережают фронт пламени. В свою

очередь, детонационное горение происходит с большой скоростью, порядка 2-3 км/с в газах, и с очень большим местным повышением давления [3].

Исследования, разработки и испытания газотурбинного двигателя с принципом детонационного сжигания топлива активно ведутся по всему миру, некоторые из них описаны в работах российских инженеров [4, 5] и зарубежных [6] инженеров.

Из огромного множества существующих концепций применения детонационного сжигания топлива в ГТД есть наиболее примечательные конструкции.

Импульсно-детонационный двигатель или резонаторный. Это тип двигателей, в котором в начале каждого цикла происходит инициирование детонационной волны с последующим сжиганием всей горючей смеси, частота циклов может варьироваться от 10 до 100 Гц. Детонационная волна возникает за счет соприкосновения двух сверхзвуковых потоков топливовоздушной смеси в резонаторной камере. Геометрия камеры имеет форму полусферы, за счет которой возникает точка фокусировки сходящихся ударных волн, затем ударная волна передаёт избыточное давление на переднюю стенку камеры сгорания, что в результате приводит к движению двигателя [7]. Испытания импульсно-детонационного двигателя и области его применения приведены в статье [4].

Ротационно-детонационный двигатель или спиновый. Данный тип детонационного двигателя имеет в своей конструкции ротационную кольцевую камеру сгорания, основной принцип которой заключается в формировании детонационной волны, идущей в окружном направлении. Важной особенностью данной камеры сгорания является формирование топливовоздушной смеси до того, как детонационная волна совершит полный оборот.

«Гибридный» ГТД также является одной из часто встречаемых конструкций в исследованиях на тему применения детонационного сжигания топлива в ГТД. Данная конструкция предусматривает в себе модернизацию классического газотурбинного двигателя путем замены основной или форсажной камеры сгорания на детонационную.

Расчеты модернизации двигателя АЛ-31Ф за счет установки импульсных детонационных форсажных камер сгорания приведены в статье [4]. Работа импульсных модулей осуществляется за счет отбора воздуха из наружного контура двигателя, по проведенным расчетам взлетная тяга двигателя при использовании 20 модулей возрастает на 2 тыс. Следовательно, данная модернизация позволит улучшить взлетные и маневренные характеристики самолета на форсированных режимах.

Схожий расчет по исследованию тягово-экономических характеристик за счет установки газодинамических резонаторов во внешнем контуре двигателя АЛ-55 был проведен В.А. Щипаковым [8]. При сравнении базового и модернизированного варианта двигателя автор указывает на улучшение тягово-

экономических и массогабаритных характеристик, а также упрощение конструкции и снижение стоимости двигателя.

Еще одним из таких проектов является модернизация двигателя БПЛА «Дань» МД-120 в НТЦ им. А. Люльки. Модернизация данного двигателя заключается в присоединении к газогенератору двигателя МД-120 блока газодинамических пульсирующих резонаторов на месте выходного устройства. В результате расчётно-экспериментальных исследований и испытаний, проведенных на смеси керосина и воздуха, выявлено, что внедрение газодинамических резонаторов на режимах работы $H = 0$, $M = 0{,}8$ даёт возможность получить тягу ГТД до 2,354 кН с уменьшением расхода топлива на 30% [8].

В статье [9] описывается замена основной камеры сгорания на экспериментальную камеру непрерывного детонационного сжигания топлива на двигателе ГТД-350. Разработка была выполнена сотрудниками Варшавского авиационного института совместно с *EADS Astrium*. В качестве топлива был использован водород и авиационный керосин.

Исходя из вышеизложенного делаем вывод о перспективности и актуальности темы по применению детонационного сжигания топлива в ГТД и необходимости дальнейшего исследования влияния данного процесса на основные характеристики и параметры двигателя.

Библиографический список

1. Митрофанов, В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. – Новосиб.: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 2003. – 200 С.
2. Курант, Р., Фридрихс, К. Сверхзвуковое течение и ударные волны. – М.: Изд. иност. литер., 1950. – 426 С.
3. Зельдович, А.Б., Компанеец, А.С. Теория детонации. – М.: Госуд. изд-во техн.-теор. литер., 1955. – 268 С.
4. Марчуков, Е.Ю., Нечаев, Ю.Н., Тарасов, А.И., Полев, А.С. Результаты стендовых испытаний пульсирующих детонационных двигателей и рациональные области их применения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2006. – Том 5, № 2–1. – С. 45–51.
5. Богданов, В.И., Дормидонтов, А.К., Пьянков, К.С., Топорков, М.Н. Повышение лобовой тяги пульсирующего ВРД с многополосной камерой сгорания постоянного объёма // Вестник машиностроения. 2012. № 7. – С. 35–39.
6. *Wave rotor topping cycles for gas turbine engines. NASA Glenn Research Center* [Электронный ресурс] / Режим доступа: *http://www.grc.nasa.gov.*
7. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных аппаратов и проблема тройных конфигураций ударных волн. // Научно-технический вестник

информационных технологий, механики и оптики. – 2016 – № 1. – С. 1–21. – т. 16.

8. Тарасов, А.И. Щипаков, В.А. Перспективы использования пульсирующих детонационных технологий в турбореактивных двигателях. // Авиацонно-космическая техника и технология. – 2011 – № 9. – С. 46–50.

9. *Piotr Kalina. Turbine engine with detonation combustion chamber in institute of aviation // Journal of KONES Powertrain and transport, vol*. 21, no. 1, 2014, *pp* 119–124.

© Лукин Ю.М., 2024

УДК 629.7.02

И.Г. МУХАРЯМОВ
Ilyasmig7@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент. Б.К. ГАЛИМХАНОВ

Уфимский университет науки и технологий

УПРУГО-ДЕМПФЕРНЫЕ ОПОРЫ

Аннотация: статья знакомит с исследованием в области применения упруго-демпферных опор для обеспечения динамических характеристик ротора ГТД.
Ключевые слова: газотурбинный двигатель; опора; критические частоты; демпфирование.

Один из серьезных проблем при создании двигателя, любого типа, является оценка работоспособности с учетом значения критических частот роторов данного двигателя. В некоторых случаях получается, что критические частоты вращения оказываются либо в зоне рабочих частот, либо на небольшом удалении, до 10 процентов. Поэтому рассматривается возможность использования упруго-демпферных опор, качество которых может позволить влиять на значения критических частот вращения. Критическая частота вращения, определяется жесткостью опоры. Упруго-демпферные опоры позволяют менять жесткости опор, с учетом демпфирования колебания ротора и могут избежать работы ротора в зоне критических частот вращения.

В данной работе рассматривается влияние жесткости опор на критические частоты вращения. В начале рассматривается однодисковый ротор рис. 1 и оценивается влияние жесткости опор в программе *Vulcan.*

Факторы определяющие критические частоты вращения.

Технологические отклонения и неточности, при изготовлении деталей роторов и их сборке, приводят к тому, что их центры тяжести не совпадают с продольной осью ротора, т.е. имеется механический дисбаланс ротора. При вращении ротора от дисбаланса возникают неуравновешенные (инерционные)

силы, которые вращаются вместе с ротором, изгибают его и при определенных условиях приводят к потере устойчивости.

На рис. 1 представлен идеализированный ротор на двух жестких опорах с симметрично расположенным диском, вращающийся с частотой ω.

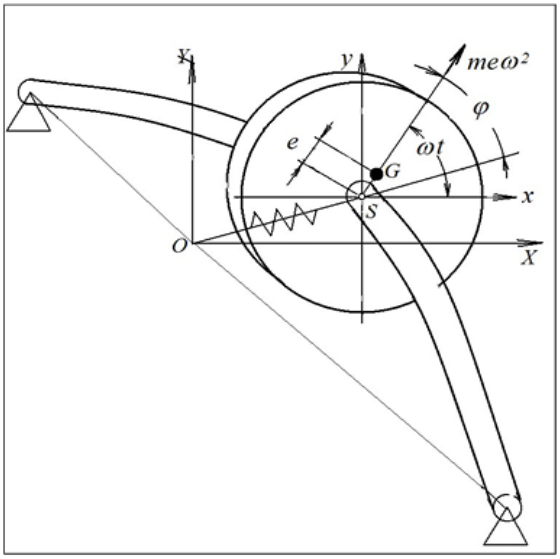


Рис. 1. Ротор под действием дисбалансной силы.
G – центр масс диска, *S* – геометрический центр диска, *e* – эксцентриситет.

Уравнение движения иметь вид:

$$m\frac{d^2}{dt^2}\left(x_s + e\cos(\omega t)\right) = -kx_s - c\dot{x}_s;$$

$$m\frac{d^2}{dt^2}\left(y_s + e\sin(\omega t)\right) = -kx_5 - c\dot{y}_s.$$

В этих уравнениях: *m* - масса диска; *k* - жесткость вала; с - коэффициент сопротивления (демпфирования); x_s ; y_s- проекции вектора перемещений центра вала в системе координат *XY.*

Графическое решение уравнения движения представлено на рис. 2.

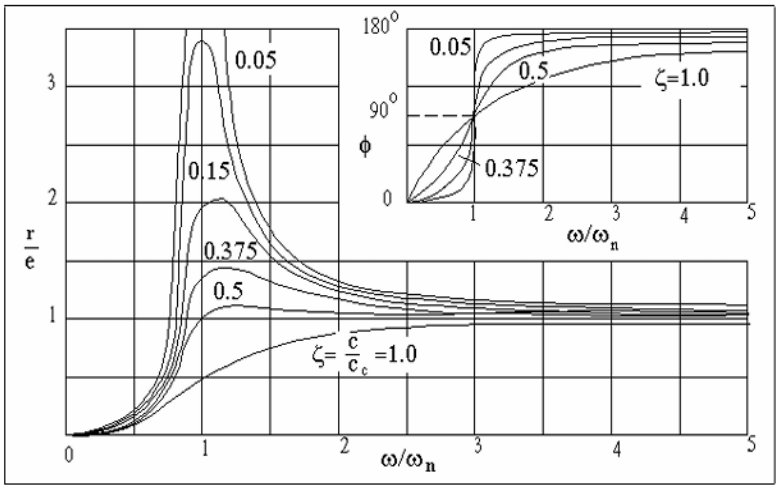


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) вынужденных колебаний ротора вращающегося дисбаланса.

Между вектором дисбалансной силы (направление *SG*) и вектором прогиба вала ротора (направление *OS*) существует угол φ, который зависит от величины демпфирования и частоты вращения ω. Из этого следует, что для рассмотренного ротора существует некоторая частота вращения, на которой он имеет большие виброперемещения. На этой частоте частота вращения ротора совпадает с частотой собственных колебаний ротора, Такая частота называется критической частотой вращения ротора.

Критическая частота вращения ротора зависит от соотношений жесткости вала и массы диска, поэтому он является динамической характеристикой ротора.

Роторы, работающие на скоростях меньших, чем критические, принято называть “жесткими”, а роторы, работающие на скоростях, превышающих критические, принято называть “гибкими”. Для “жестких” роторов состояние равновесия является статическим. Для них характерно увеличение прогибов и усилий, действующих на опоры, с увеличением угловой частоты вращения. “Гибкие” роторы находятся в состоянии динамического равновесия.

Снижения амплитуды вибраций можно добиться различными способами - уменьшением эксцентриситета центра массы ротора (балансировкой), снижением критической частоты вращения, увеличением диссипации энергии колебаний в роторной системе (демпфированием).

Последние две функции и выполняют демпферные опоры в газотурбинных двигателях, которые часто называют также упруго-демпферными.

Основные функции демпферных опор:

– снижение жесткость опоры ротора, что приводит к изменению упругой динамической системы двигателя. При этом снижаются частоты собственных колебаний системы, устраняются резонансы на рабочих режимах;

– поглощение энергии колебаний динамической системы двигателя, превращая ее в тепло, что не позволяет развиваться большим амплитудам колебаний, динамическим нагрузкам и напряжениям во всех деталях двигателя.

Требования к конструкциям демпферных опор:

– обладать оптимальной радиальной жесткостью, которая определяется из расчетов полной динамической системы двигателя. Целью этих расчетов является устранение резонансных частот из области рабочего диапазона двигателя;

– обладать вполне определенной демпфирующей способностью для предотвращения повышенных уровней вибраций в узлах двигателя в различных условиях его работы, в том числе экстремальных;

– при наличии упругих элементов допускать радиальные деформации достаточной величины для создания демпфирования, при этом сохранять допустимые зазоры по рабочим лопаткам и лабиринтным уплотнениям.

В настоящее время в газотурбинных двигателях применяются несколько основных типов демпферных опор:

– с нецентрированным гидродинамическим демпфером (без разгрузки веса);

– с гидродинамическим демпфером, центрированным с помощью упругого элемента типа "беличье колесо» (с разгрузкой веса);

– с гидравлическим демпфером, центрированным с помощью упругого кольца – “кольцо Аллисона” (с разгрузкой веса);

– с гидродинамическим демпфером, центрированным с помощью внешнего упругого кольца (с разгрузкой веса);

– со ступенчатым гидродинамическим демпфером (с частичной разгрузкой веса).

Процесс проектирования демпферных опор базируется на результатах параметрического анализа динамической системы двигателя и включает в себя следующие предварительные этапы:

– определение опасных режимов в работе двигателя, характеризующихся большим уровнем вибраций и динамическими нагрузками;

– принятие решения о применении опоры с демпферным устройством;

– определение оптимальных значений жесткости и демпфирования опорного узла ротора;

– выбор типа демпферной опоры.

В зависимости от типа демпферной опоры проводятся необходимые расчеты, и далее разрабатывается ее конструкция.

Обычно гидродинамический демпфер рассчитывается для работы в диапазоне частот вращения ротора, где находится зона повышенных вибраций роторной системы. Это может быть зона соответствующей критической частоты вращения ω_c, либо рабочая частота вращения ротора ω, на которой неуравновешенные силы достигают максимальных значений.

Основные параметры демпфера, с помощью которых можно управлять его жесткостью и демпфированием, являются радиус, длина и зазор демпфера.

Далее рассмотрим широк используемый вид упруго-демпферной опоры – беличье колесо, представленная на рисунке 3.



Рис. 3. Упругая втулка передней опоры компрессора высокого давления АЛ-31Ф.

Жесткость опоры определяется толщиной стенки втулки, шириной прорезей, количеством и длиной образовавшихся стержневых элементов.

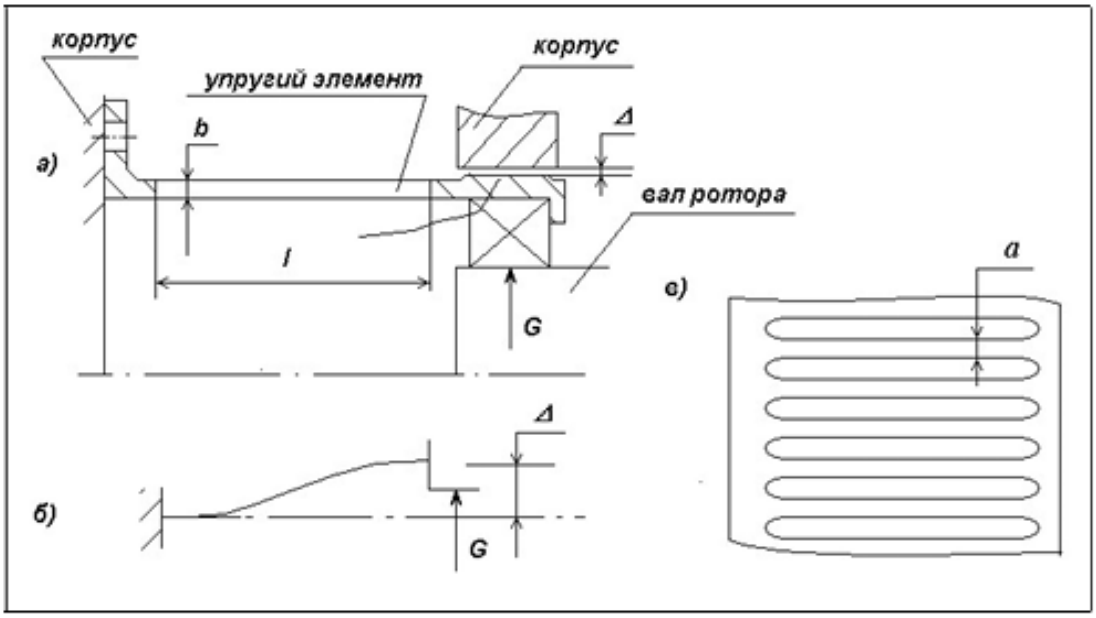


Рис. 4. Упругий элемент опоры типа “беличье колесо”: а – конструктивная схема и основные размеры; б – схема работы балочек при нагружении опоры; в – развертка упругого элемента.

Демпфером опоры является тонкий масляный слой между втулкой и корпусом толщиной 0,15....0,3 мм. Демпфирующие свойства опоры зависят от толщины и ширины масляного слоя. Поэтому эти размеры оптимизируются расчетными методами и дорабатываются экспериментально.

Суммарная жесткость опоры складывается из жесткости упругой части опоры k_y и жесткости гидродинамического слоя k_g:

$$k_\Sigma = k_y + k_g.$$

Динамические характеристики опоры с упругим элементов показана на рисунке 7.

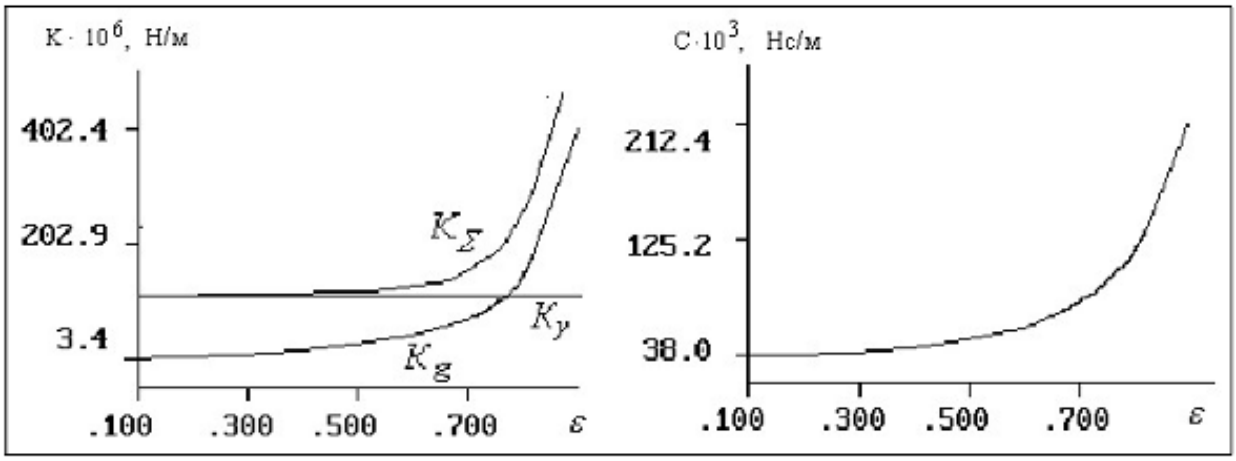


Рис. 5. Жесткостная и демпфирующая характеристика демпферной опоры с упругим элементом.

Далее рассмотрим алгоритм расчёта опоры с гидродинамическим демпфером и упругим элементом.

Проектирование демпферной опоры с упругой втулкой состоит из двух частей: проектирования гидродинамического демпфера и проектирования упругой втулки.

Исходные данные, как суммарная жесткость опоры К, коэффициент демпфирования C, частота вращения ротора n, вязкость масла μ, масса ротора $m_в$, приходящая на опору и диаметр демпфера D определяются заранее.

Далее, используя рекомендуемое значение гравитационного параметра $\bar{W} = 0{,}1$, определим оптимальный зазор в демпфере δ:

$$\delta = \frac{W_B}{m_B \cdot \omega^2 \cdot \bar{W}}$$

где, $W_В = m_В g$.

По параметру B=0,1 определим длину демпфера $L_{пр}$:

$$B = \frac{\mu \cdot R \cdot L_{пр}^3}{m_B \cdot \omega_C \cdot \delta^3}$$

После определения основных размеров демпфера по обобщенным параметрам необходимо рассчитать динамические характеристики выбранного демпфера - жестокость и демпфирование и согласовать их с заданными.

Коэффициенты жесткости и демпфирования для стационарных режимов показан в таблице 1.

Таблица 1.

Рабочая длина пленки	"Короткий" демпфер	
	π – пленка	2π - пленка
K	$\frac{RL^3\mu\omega}{\delta^3}\cdot\frac{2\varepsilon}{(1-\varepsilon^2)^2}$	0
C	$\frac{RL^3\mu}{2\delta^3}\cdot\frac{\pi}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}}$	$\frac{RL^3\mu}{\delta^3}\cdot\frac{\pi}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}}$
Рабочая длина пленки	"Длинный" демпфер	
	π – пленка	2π - пленка
K	$\frac{R^3L\mu\omega}{\delta^3}\cdot\frac{24\varepsilon}{(2+\varepsilon^2)(1-\varepsilon^2)}$	0
C	$\frac{R^3L\mu}{\delta^3}\cdot\frac{12\pi}{(2+\varepsilon^2)(1-\varepsilon^2)^{1/2}}$	$\frac{R^3L\mu}{\delta^3}\cdot\frac{24\pi}{(2+\varepsilon^2)(1-\varepsilon^2)^{1/2}}$

Так как мы проектируем центрированный гидродинамический демпфер, то он должен обладать жесткостью ниже жесткости беличьего колеса.

Следует иметь в виду, что приближенные формулы, которые использовались для расчета, не учитывают давление подачи масла, от которого зависит длина зоны кавитации. Поэтому проектирование велось таким образом, чтобы любой режим кавитации в демпфере дал приемлемые результаты.

После расчета гидродинамического демпфера, рассчитываются упругие и прочностные характеристики упругой втулки. Исходные данные, как вес ротора G, радиальный зазор δ, длина l и ширина A_p прорези, наружный $D_н$ и внутренний $D_{вн}$ диаметры втулки, количество стержней n, материал опоры выбираются заранее.

Порядок выполнения расчета выглядит так:

– определяется ширина a и высота b каждого стержня:

$$a = \frac{\pi(D_H + D_{BH})}{2\pi} - A_P;$$
$$b = \frac{(D_H - D_{BH})}{2}.$$

– жесткость К упругой втулки:

$$К = \frac{nEab(a^2 + kb^2)}{2l^2}.$$

– максимальные динамические напряжения в стержнях опоры при перемещении на максимальный зазор:

$$\sigma_d = \frac{3E\delta}{l^2}(k^{\frac{2}{3}}bcos\varphi + a\sin\varphi).$$

– прогиб втулки от весовой нагрузки:

$$\delta_0 = G/K.$$

– статические напряжения в стержнях по действием весовой нагрузки

$$\sigma_\delta = \sigma_d \frac{\delta_0}{\delta}.$$

– запас по пределу прочности для материала

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1} \cdot 0{,}85 \cdot \sigma_\delta}{k_\sigma \cdot \sigma_d}.$$

Минимальный запас по пределу прочности должен быть не менее 1,3.

Вывод: в данной работе рассмотрен важный вопрос в области проектирования опор ГТД. Изучены особенности динамических характеристик быстро вращающихся роторов. Показаны особенности поведения упруго-демпферных опор. Для использования в учебном процессе разработан алгоритм оценки жесткостных характеристик подобных опор на примере опоры типа “беличье колесо”.

Библиографический список

1. Леонтьев М.К. Конструкция и расчет демпферных опор роторов ГТД. МАИ 2020.

Старцев Н.И. Конструкция и проектирование основных узлов и систем авиационных двиагетелй и энергетических установок. Книга вторая. Камера сгорания и опоры ГТД. Самара 2013

© Мухарямов И.Г., 2024

УДК 620.193.14, 620.195

И.Г. НЕВОСТРУЕВ
Ivan2001nevostruev@mail.ru
Науч. руководов. – докт. техн. наук, проф. И.Х. БАДАМШИН
Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА РЕСУРС РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

Аннотация: в статье рассмотрены основные принципы влияния жаростойких покрытий на ресурс рабочих лопаток турбин, приведены и проанализированы

существующие расчетные модели напряженно-деформированного состояния лопаток турбин с жаростойкими покрытиями, выполнена расчетная оценка ресурса охлаждаемой рабочей лопатки турбины с жаростойким покрытием и без него по методу конечных элементов совместно с аналитическим расчетом. *Ключевые слова*: жаростойкие покрытия; ресурс рабочих лопаток турбин; напряженно-деформированное состояние; охлаждаемая лопатка; сульфидная коррозия, длительная прочность.

Передовые представители авиационной промышленности постоянно работают над повышением ресурса производимых газотурбинных двигателей. В перспективе это дает возможность конечному потребителю снижать затраты на ремонт и обслуживание всего парка авиационной техники, и если рассматривать двигатель как инструмент, позволяющий воздушному судну приносить доход, то выявляется закономерное влияние показателей совершенства и назначенного ресурса узлов двигателя на коммерческую привлекательность для будущих эксплуатантов, что немаловажно в условиях изменяющегося рынка.

Чтобы сделать серийный двигатель коммерчески привлекательным необходимо увеличить его ресурс. Это можно реализовать повышением прочностной надежности отдельных элементов двигателя, например рабочих лопаток турбины.

Одним из важнейших условий обеспечения высокой надежности лопаток является их защита от разрушающего воздействия неоднородного газового потока. Наличие твердых и жидких частиц в газовом потоке усиливает его эрозионное воздействие, которое приводит к быстрому износу, снижению работоспособности или разрушениям лопаток.

Нахождение лопатки в неоднородном газе вызывает коррозионные процессы. К типичным процессам газовой коррозии относится высокотемпературное окисление в газовой среде, сульфидирование из соединений, содержащих серу, азотирование из компонентов газа, содержащих углерод, взаимодействие с соединениями, содержащими хлор и другими веществами газового потока [1]. Постоянное протекание этих процессов снижает ресурс лопаток. Одним из способов сохранения высокой долговечности лопаток в коррозионной среде является применение жаростойких защитных покрытий.

Жаростойкие покрытия на основе алюминидов никеля позволяют снизить скорость окисления металла лопатки, но в то же время, вследствие приложения

дополнительной массы от покрытия дают негативный эффект, который выражается увеличением центробежной нагрузки на лопатку. Также одним из немаловажных факторов влияния на общее напряженно-деформированное состояние (НДС) лопатки является возникновение термических напряжений на границе «жаропрочный сплав – покрытие», которые обосновываются различными коэффициентами линейного расширения, модулями Юнга материалов.

При совершенствовании жаростойких покрытий стремятся к получению сжимающих напряжений в поверхности пера лопатки, но не всегда удается получить однозначно положительный результат, так как многое зависит от состава покрытия, его толщины, способа нанесения.

Целью исследования в настоящей статье является оценка влияния жаростойких защитных покрытий на НДС и ресурс рабочей лопатки турбины. В рамках исследования решается частная задача влияния температурных напряжений, возникающих на границе покрытия и основного материала лопатки, а также задача влияния массы покрытия на напряженно-деформированное состояние. Расчеты проведены на стационарном взлетном режиме работы двигателя. В качестве материала лопатки был выбран серийный никелевый жаропрочный сплав типа ЖС6У, в качестве покрытий рассматриваются жаростойкие покрытия на основе алюминидов никеля типа СДП-1, СДП-2. В модели учитывается тепловое состояние лопатки, полученное в результате расчета сопряженного теплообмена с подводом охлаждающего воздуха в рабочую лопатку (рис. 1).

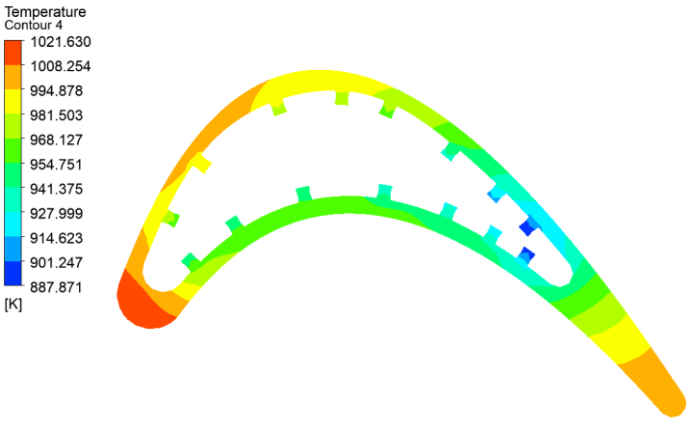


Рис. 1. Градиент температур по толщине пера лопатки в сечении близком к среднему по высоте пера лопатки, полученный в результате расчета сопряженного теплообмена с подводом охлаждающего воздуха в рабочую лопатку

Средний состав сплава лопатки и покрытий представлен в таблице 1. Плотность, модуль Юнга, термический коэффициент линейного расширения, теплопроводность, теплоемкость при постоянном давлении материалов лопатки и покрытий, используемые в расчетах, представлены в работах [3], [4], [5].

Таблица 1

Средний состав сплава лопатки и покрытий

Сплав	Содержание легирующих элементов, %								
	Cr	*Al*	*Ti*	*Mo*	*W*	*Co*	*Nb*	*C*	*Y*
ЖС6У	8,7	5,5	2,5	1,8	10	1	1	0,15	0,35
СДП-1 (*Ni*20*C*020*Cr*12*AlY*)	20	12	-	-	-	20	-	-	0,35
СДП-2 (*Ni*20*Cr*12*AlY*)	20	12	-	-	-	-	-	-	0,35

В расчетной модели исследования принимаются следующие допущения:

1. Учитываются температурные напряжения, возникающие вследствие различий свойств материалов лопатки и покрытия, но не учитывается влияние жаростойких покрытий на тепловое состояние, ввиду близких по значениям коэффициентов теплопроводности;

2. Не учитывается влияние газовой коррозии;

3. Принимается что слои покрытия, в случае многослойной композиции, имеют одинаковую относительную деформацию вдоль нормали к поверхности;

4. Свойства материалов принимаются изотропными по их толщине;

5. Величина коэффициента Пуассона принимается одинаковой для всех материалов и равной 0,3.

С помощью метода конечных элементов в программном комплексе *ANSYS Mechanical* был выполнен расчет НДС лопатки без покрытия и с жаростойкими покрытиями, которые задавались на поверхности пера лопатки с помощью функции *Surface Coating*. Оценка НДС произведена для сечения близкого к среднему по высоте пера лопатки. В результате расчета получены эквивалентные напряжения, учитывающие центробежные нагрузки от массы лопатки без покрытия и с покрытиями, растягивающие и изгибающие нагрузки от газовых сил, а также тепловое состояние лопатки, см. рис. 2, 3, 4, таблица 2.

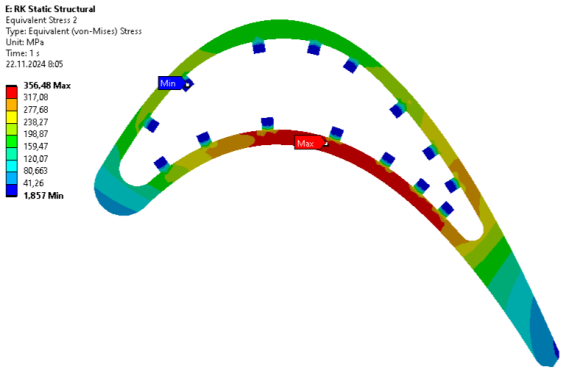


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в близком к среднему сечении пера лопатки из сплава ЖС6У без покрытия

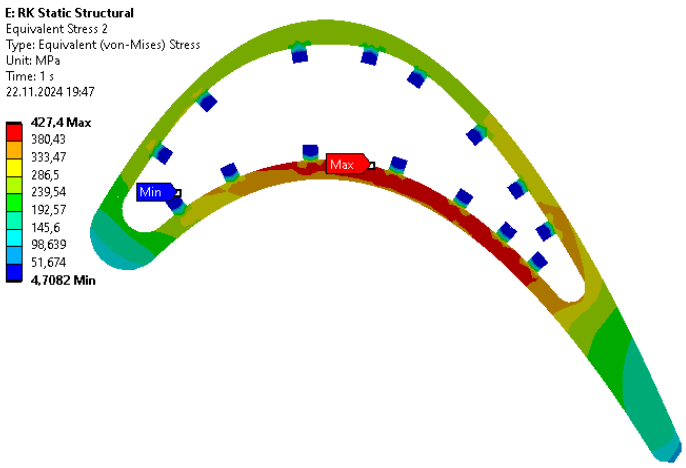


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в близком к среднему сечении пера лопатки из сплава ЖС6У с покрытием типа СДП-1 (*Ni*20*C*020*Cr*12*AlY*)

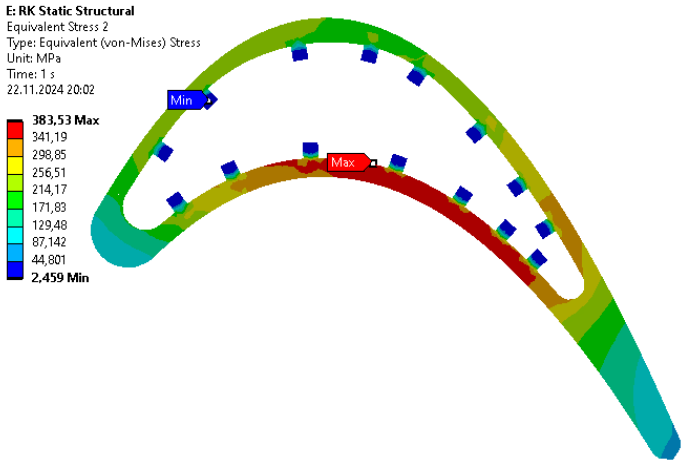


Рис. 4. Эквивалентные напряжения в близком к среднему сечении пера лопатки из сплава ЖС6У с покрытием типа СДП-2 (*Ni*20*Cr*12*AlY*)

Далее необходимо определить напряжения, возникающие на границе «жаропрочный сплав – покрытие».

В основе расчетов используется формула, предложенная С.А. Будиновским [2], которая связывает толщину слоев, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, термический коэффициент линейного расширения с уровнем упругих напряжений, возникающих при нагреве в поверхности пера лопатки турбины. Считая, что нулевой слой композиции является стенкой лопатки, а последующие слои представляют собой покрытие, можно записать следующее выражение для определения действующих упругих напряжений в поверхности стенки лопатки с многослойным покрытием, содержащим n слоев:

$$\sigma_0^i = \frac{E_0 \Delta T \sum_{i=1}^{n} E_i x_i (\alpha_i - \alpha_0)}{(1-\mu)\left[E_0 x_0 + \left(\sum_{i=1}^{n} E_i x_i\right)\right]},$$

где E_0, E_i – модули упругости материала лопатки и покрытия i-го слоя соответственно, α_0, α_i – термический коэффициент линейного расширения материала лопатки и покрытия i-го слоя, x_0, x_i – толщина стенки лопатки и i-го слоя покрытия, ΔT – разность температур до и после нагрева композиции, μ – коэффициент Пуассона. Используя предлагаемое соотношение, были определены напряжения, возникающие на границе «жаропрочный сплав – покрытие», для лопатки из ЖС6У с толщиной стенки 0,6 мм с однослойными покрытиями типа СДП-1, СДП-2, толщиной 0,05 мм, результаты расчетов представлены в таблице 2.

Зная уровень температурных напряжений в поверхности пера лопатки, можно определить предел длительной прочности при заданном постоянном коэффициенте запаса прочности (КЗП) по суммарным напряжениям:

$$\sigma_\tau^t = k_{\sigma_\Sigma}\left(\sigma_{\text{экв}} + \sigma_0^i\right).$$

В расчетах КЗП по длительной статической прочности принят равным 1,5. Зная предел длительной прочности, температуру в расчетной точке, можно определить ресурс лопатки в часах с помощью параметра Ларсона-Миллера:

$$P = T(lg\tau + C),$$

где T – температура в расчетной точке, τ – ресурс лопатки в часах, C – константа (в расчетах принята равной 20). По известным напряжениям, соответствующим различным значениям параметра Ларсона-Миллера для ЖС6У [6], в программном комплексе *Microsoft Office Excel* была построена аппроксимирующая кривая, по ней определены параметры Ларсона-Миллера и ресурс материала лопатки в часах, см. таблица 2. Величина достоверности аппроксимации по среднеквадратичным отклонениям составила 0,985.

Таблица 2

Влияние жаростойких покрытий на напряженно-деформированное состояние и ресурс рабочей лопатки турбины

Композиция	ЖС6У без покрытия	ЖС6У +СДП-1	ЖС6У +СДП-2
1	2	3	4
Температура в расчетной точке T, ℃	685,62	685,64	685,39
Модуль упругости основного материала лопатки/покрытия для температуры в расчетной точке $E \cdot 10^{-11}$, Па	1,65	1,65/1,43	1,65/1,49
Термический коэффициент линейного расширения основного материала лопатки/покрытия для температуры в расчетной точке $\alpha \cdot 10^6$, 1/℃	12,96	12,96/20,8	12,96/19,31

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
Максимальные эквивалентные напряжения в расчетной точке $\sigma_{экв}$, МПа	356,48	427,4	410,7
Напряжения на границе «жаропрочный сплав – покрытие» с однослойным покрытием $\sigma_0^{i=1}$, МПа	–	82,62	69,9
Длительная прочность σ_τ^t, МПа	534,72	765,03	720,9
Параметр Ларсона-Миллера $P \cdot 10^{-3}$	23,11	20,46	20,94
Ресурс τ, час	12644,3	21,87	70,13

Выводы:

1. При учете температурных напряжений на границе «жаропрочный сплав – покрытие» возможно возникновение как растягивающих, так и сжимающих напряжений, в зависимости от условий. В модели учитывался экстремальный случай, когда растягивающие напряжения в поверхности материала лопатки суммируются с эквивалентными напряжениями, что в частном случае приводит к снижению запаса по длительной статической прочности;

2. Полученные результаты расчета напряженно-деформированного состояния лопатки из жаропрочного никелевого сплава типа ЖС6У с толщиной стенки в сечении близком к среднему 0,6 мм без покрытия и с покрытиями типа СДП-1, СДП-2 толщиной 0,05 мм говорят о значительном отрицательном влиянии покрытий на ресурс рабочей лопатки турбины, что обосновывает необходимость снизить толщину покрытия при проектировании системы «жаропрочный сплав-покрытие» или применить другие типы однослойных или комбинированных покрытий. Однако при одновременном отрицательном результате в технической литературе накоплен большой экспериментальный опыт положительного влияния жаростойких покрытий на длительную прочность защищаемых сплавов в коррозионной газовой среде, который в данном исследовании не рассматривается.

Библиографический список

1. А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. Газотурбинные двигатели – П.: Авиадвигатель, 2006. – 1204 с.

2. Будиновский, С.А. Применение аналитической модели определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе в решении задач по созданию жаростойких алюминидных покрытий / С.А. Будиновский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 3. – С. 3–11.

3. Материалы деталей авиационных двигателей: учебный справочник по дисциплине «Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; авт.-сост.: В.Ф. Харитонов, П.В. Соловьев. – Уфа: УГАТУ, 2021. – 80 с.

4. Кузнецов, В.П. К89 Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов: учебное пособие / В.П. Кузнецов, В.П. Лесников, Н.А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 160 с.

5. *Tamarin Y.A. Protective Coatings for Turbine Blades. ASM International*, 2002. – 247 p.

6. Жаропрочность никелевых сплавов / Е.Н. Каблов, Е.Р. Голубовский. – М.: Машиностроение. 1998. – 464 с. ISBN 5-217-02883-1.

© Невоструев И.Г., 2024

УДК 629.7

Т.В. СОЛДАТОВ, И.А. ГАЙНАНОВ
ilyas.gnov@mail.ru, t.soldatovufa@mail.ru
Науч. руководов. – ст. преподаватель Н.Б. СИМОНОВ

Уфимский университет науки и технологии

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОГО И КРУГЛОГО СОПЛА ДЛЯ ТРД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS FLUENT

Аннотация: данная статья представляет собой сравнительный анализ характеристик плоского и круглого реактивного сопла, используемого в турбореактивном двигателе (ТРД), с помощью численного моделирования в *ANSYS Fluent*. Анализ включает в себя сравнение инфракрасной сигнатуры струи (скорости потока, распределения давления и температуры для двух типов сопел).

Ключевые слова: плоское сопло, круглое сопло, турбореактивный двигатель, *ANSYS Fluent*, численное моделирование, тяга, расход топлива, распределение давления.

Разработка сопла – важнейшая часть в создании малозаметного летательного аппарата. Для снижения инфракрасной заметности, критическим является выбор оптимальной формы сопла, поскольку от нее напрямую зависит эффективность боевого применения. В данной статье сравниваются инфракрасные характеристики плоского и круглого сопла (рис. 1) в *ANSYS FLUENT*.

Для анализа было рассчитано круглое и плоское сопло по методике расчёта [1].

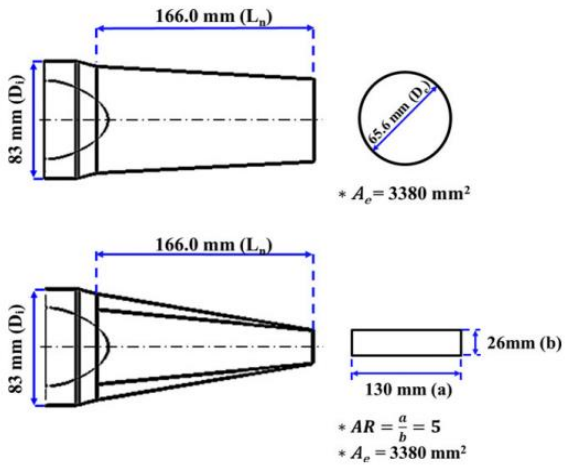


Рис. 1. Конструкция плоского и круглого сопла

В таблице 1 приведены основные геометрические и газодинамические параметры сопел.

Таблица 1

Наименование	Обозначение	Значение
Массовый расход газа	$\dot{m}$	12,5 кг/с
Полное давление	p_0	$23 \cdot 10^5$ Па
Температура торможения	T_0	1120 К
Удельная газовая постоянная	R	287,1 Дж/(кг · К)
Угол сужающейся обечайки	α	26°
Угол расширяющейся обечайки	β	11°
Давление окружающей среды	$p_н$	$0{,}8 \cdot 10^5$ Па
Показатель изоэнтропы	k	1,4

Массовый расход:

$$\dot{m} = B\frac{p_0}{\sqrt{T_0}}S_* \cdot q(\lambda),$$

где $q(\lambda) = 1$,

$$S_* = \frac{\dot{m}\sqrt{T_0}}{q(\lambda)\cdot B p_0}.$$

Диаметр критического сечения:

$$d_* = 2\sqrt{\frac{S_*}{\pi}}.$$

Местная скорость звука в газе:

$$a_* = \sqrt{\frac{2kR}{k+1}T_0}.$$

На рис. 1 представлены размеры конструкции двух сопел. Входное сечение сопла, выходное сечение и общая длина по результатам расчета ровна: 0,083 0,0656 0,166 мм соответственно (рис. 1).

Для моделирования плоского сопла применен коэффициент кратности 5, что обусловлено более эффективным рассеиванием потока [3]. Полученная геометрия использована для последующих расчетов в *ANSYS FLUENT*.

Важным аспектом при сравнении полученных результатов является переход потока из дозвукового в сверхзвуковой режим в критическом сечении, характеризующийся значением числа Маха $M = 1$. Результаты моделирования при одинаковых исходных данных демонстрируют, что в круглом сопле скорость потока достигла 1 Маха, тогда как скорость потока в плоском сопле составила 95,5% от скорости звука, что указывает на его эффективность, относительно осесимметричного сопла.

Распределение температуры выхлопных газов, измеренное на каждой секции при установке двух форсунок, представлено на рис.3. При установке прямоугольной форсунки поток выхлопных газов распределяется на расстоянии 120 мм при температуре около 400°C в положении 0,2°. В положении 2*D*e он распределяется на 170 мм при температуре около 250°C, а в положении 4*D*e он распределяется на 210 мм при температуре около 150°C. При установке круглого сопла максимальная температура выхлопного газа распределяется на расстоянии 50 мм при температуре около 400°C в положении 0,2°. В положении 2*D*e максимальная температура составляет около 380°C, а в положении 4*D*e максимальная температура составляет около 290°C. На рисунке показана симметричная форма, постепенно уменьшающаяся при высокой температуре в центре. Температура струи на выходе из двух выпускных патрубков одинакова. Однако можно видеть, что чем дальше от выходного патрубка, тем ниже максимальная температура струи, выходящей из прямоугольного сопла, примерно на 130-140°C. Скорость, с которой температура струи на выходе из выхлопного сопла уменьшается с увеличением расстояния.

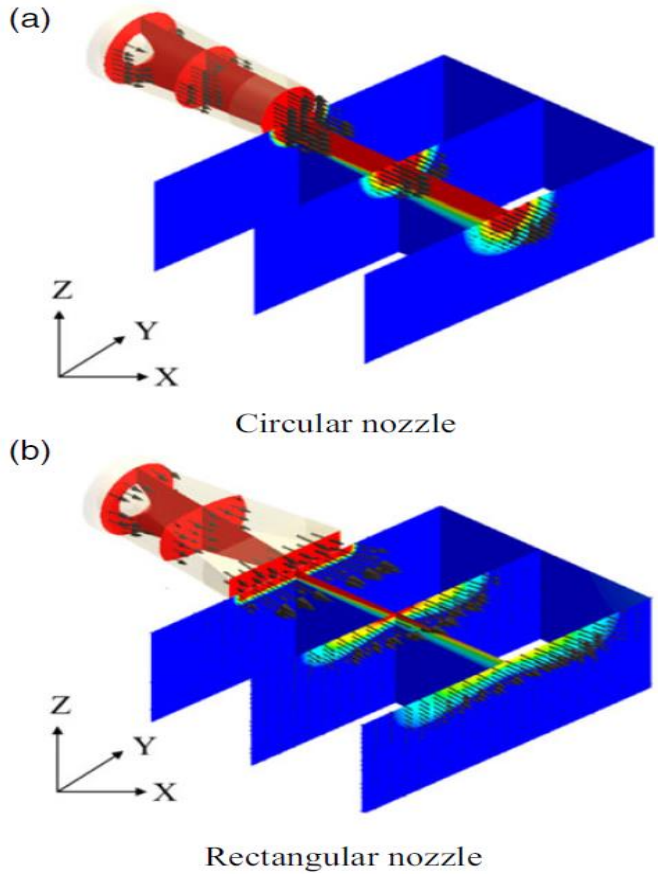


Рис. 2. Распределение потока газа

Согласно результатам эксперимента, при установке прямоугольного выхлопного патрубка удельный расход топлива двигателя был выше, чем при установке круглого патрубка, примерно на 3,6%. Инфракрасная сигнатура была снижена примерно на 5%. Согласно измерениям, когда прямоугольное выхлопное сопло было установлено в положении 4*D*e от выхода из сопла, температура выхлопного шлейфа была примерно на 130-140°C ниже, чем у круглого выхлопного сопла. Распределение температуры и относительный размер выхлопного шлейфа имели форму, практически идентичную распределению скорости.

Численный анализ потока показал, что поперечная составляющая скорости создается с большей величиной, чем у круглого выпускного сопла, из-за быстрого изменения формы внутри прямоугольного сопла, и поток выхлопных газов рассеивается к выходу из сопла. Считается, что это приводит к увеличению смешивания с наружным воздухом и снижению температуры выхлопного шлейфа в большей степени, чем при использовании круглого сопла.

Библиографический список

1. *Dimotakis, P.E., Miake lye, R.C. and Papantoniou, D.A. Structure and dynamics of round turbulent jets, Phys. Fluids*, 1983, 26, (11), *pp* 3185.

2. *Yule, A.J. Large-scale structure in the mixing layer of a round jet, J. Fluid Mech.*, 1978, 89, (3), *pp* 413–432.

3. *Crow, S.C. and Champagne, F.H. Orderly structure in jet turbulence, J. Fluid Mech.*, 1971, 48, (3), *pp* 547–591.

4. *Mahulikar, S.P., Sonawane, H.R. and Rao, G.A. Infrared signature studies of aerospace vehicles, Prog. Aerospace Sci.*, 2007,43, (7-8), pp 218–245.

5. *Lamb, M., Taylor, J.G. and Frassinelli, M.C. Static Internal Performance of a Two-Dimensional Convergent-Divergent Nozzle with External Shelf, NASA technical memorandum* 4719, 1996.

6. *Sfeir, A.A. The velocity and temperature fields of rectangular jets, Int. J. Heat Mass Transfer*, 1976, 19, (11), pp 1289–1297.

7. *Gutmark, E., Schadow, K.C. and Wilson, K.J. Jet dynamics in supersonic combustion, J. Propul. Power*, 1989, 5, (5), pp 529–533.

8. *Ehsan, F., Maddahian, R., Faghani, P. and Farhanieh, B. Numerical investigation of turbulent free jet flows issuing from rectangular nozzles: the influence of small aspect ratio, Arch. Appl. Mech.*, 2010, 80, (7), *pp* 727–745.

© Солдатов Т.В., Гайнанов И.А., 2024

УДК 629.7

А.О. СТЯЖКИН
magistrant@internet.ru
Науч. руководов – д.т.н., проф. И.А. КРИВОШЕЕВ

Уфимский Университет Науки и Технологий

ЧИСЛЕННОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В СОПЛАХ ЛАВАЛЯ С КОСЫМ СРЕЗОМ В ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Аннотация: В настоящее время возобновились исследования сопел с косым срезом, так как они могут стать компромиссом в достижении оптимальных газодинамических и массо-габаритных характеристик выходного устройства и летательного аппарата в целом. В данной статье будут рассмотрены течения из сопел Лаваля с косым срезом на расчётном режиме, режиме недорасширения и режиме перерасширения.

Ключевые слова: численное моделирование, сверхзвуковые течения, реактивное сопло, сопло Лаваля, косой срез.

Выбранной геометрией для исследования является контур сопла Лаваля [3, с. 78], представленный на рисунке 1. Суживающаяся часть была изменена, для повышения общего качества сетки конечных элементов. Расчёты

проводились в программном комплексе *ANSYS* 2021 *R*2 *Workbench* в модуле *Fluent*.

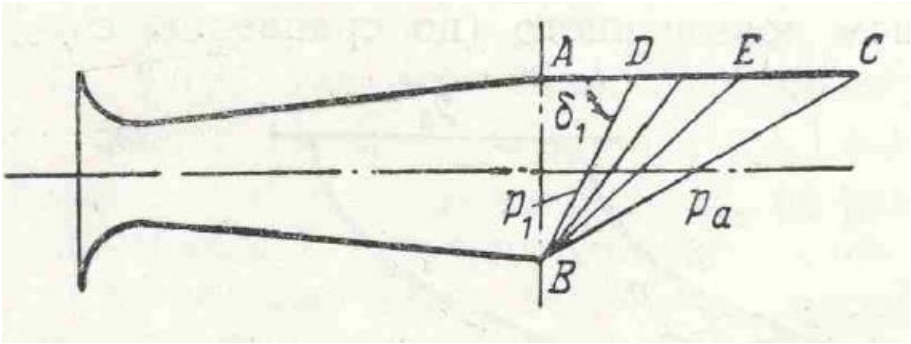


Рис. 1. Базовая геометрия сопла

Для начала было проведено исследование сеточной сходимости для выбранной геометрии. Для этой цели в сеткопостроителе *Meshing* были сгенерированы 8 моделей конечных элементов. Граничные условия (ГУ) изображены на рисунке 2. Рабочее тело расчётных моделей – идеальный газ. Модель турбулентности – *k-e Realizable.*

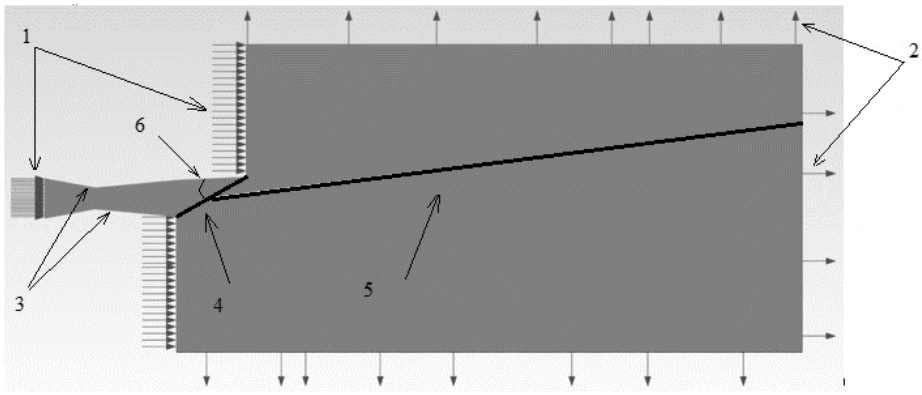


Рис. 2. Граничные условия и условные обозначения:
1 – ГУ «Вход»; *2* – ГУ «Выход»; *3* – ГУ «Стенка»; *4* – Плоскость среза сопла; *5* – Ось реактивной струи; *6* – Угол среза сопла

Критерием для оценки сеточной сходимости являлся коэффициент восстановления полного давления (КВПД) в плоскости среза сопла (см. рис. 2). На рисунке 3 представлен график зависимости КВПД от числа конечных элементов модели. Сеточная сходимость достигается приблизительно от 2 млн конечных элементов.



Рис. 3. Зависимость КВПД от количества конечных элементов расчётной модели

Для выявления принципиальных отличий истечения реактивной струи на различных режимах работы сопла, был построен контур сопла Лаваля с косым срезом, расположенным под углом (см. рис. 2) 27 градусов. Угол подбирался таким образом, чтобы на расчётном режиме первая характеристика проходила через верхнюю кромку. Настройки решателя выбраны такими же, как при исследовании сеточной сходимости. Давление на входе для расчётного режима – 10 атмосфер, для режима с перерасширением – 6 атмосфер и для режима с недорасширением –14 атмосфер.

На рисунке 4 изображены картины изменения плотности рабочего тела в зависимости от режима работы сопла. Для всех режимов работы наблюдается образование сложных систем косых скачков уплотнений и разрежений. Для режима с перерасширением (давление на срезе меньше давления среды), отклонение потока происходит против часовой стрелки. Для расчётного режима и режима с недорасширением поток отклоняется по часовой стрелке.

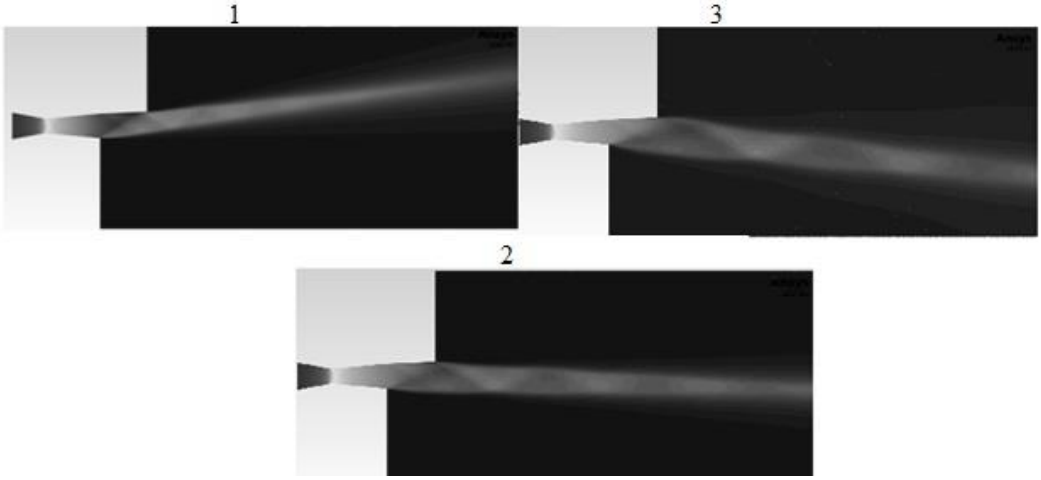


Рис. 4. Картины изменения плотности потока для режимов работы сопла:
1 – Режим перерасширения; *2* – Расчётный режим; *3* – Режим недорасширения

На рисунке 5 представлены графики изменения числа Маха вдоль оси реактивной струи (см. рис. 2) для различных режимов.

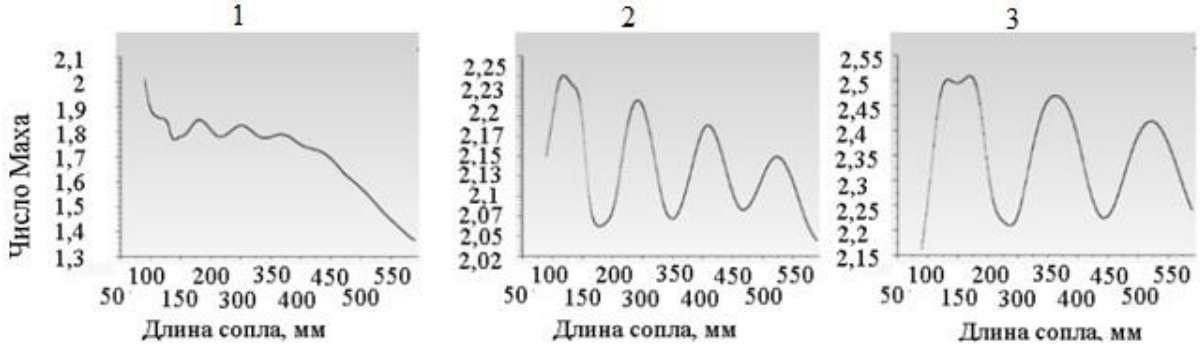


Рис. 5. Изменение числа Маха вдоль оси реактивной струи для различных режимов истечения: *1* – Режим перерасширения; *2* – Расчётный режим; *3* – Режим недорасширения

На рисунке 6 представлены графики изменения статического давления вдоль оси реактивной струи для различных режимов.

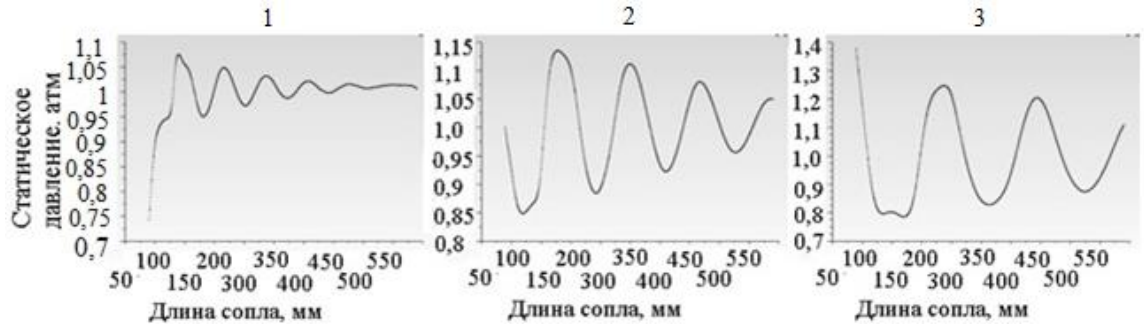


Рис. 6. Изменение статического давления вдоль оси реактивной струи для различных режимов истечения: *1* – Режим перерасширения; *2* – Расчётный режим; *3* – Режим недорасширения

В таблице 1 приведено сравнение основных параметров между рассмотренным соплом с косым срезом и аналогичным соплом с прямым срезом. На расчётном режиме сопло с косым срезом показывает повышенную тягу и скорость истечения рабочего тела при небольшом уменьшении коэффициента восстановления полного давления.

Таблица 1

Основные параметры сопл на различных режимах истечения

	КВПД		Тяга, Н		Число Маха	
	Прямой срез	Косой срез	Прямой срез	Косой срез	Прямой срез	Косой срез
Режим с перерасширением	0,927	0,925	5477,5	5607,1	2,19	2,09
Расчётный режим	0,934	0,933	9112,8	9352	2,23	2,33
Режим с недорасширенем	0,937	0,937	12744	13080	2,65	2,63

Библиографический список

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика: учебное пособие / Г.Н. Абрамович. – Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1969. – 824 с.
2. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика : учебное пособие / М.Е. Дейч. – Москва: Госэнергоиздат, 1961. – 675 с.
3. Жирицкий, Г.С., Локай, В.И., Максутова, М.К., Струнки, В.А. Газовые турбины авиационных двигателей: учебное пособие / Г.С. Жирицкий. – Москва: Металлургиздат,1963. – 608 с.

© Стяжкин А.О., 2024

УДК 621.458

Т.Р. СУБХАНКУЛОВ
subhankulov1506@mail.ru
Науч. руководов. – д-р. техн. наук, проф. И.М. ГОРЮНОВ.

Уфимский университет науки и технологий

АДАПТИВНЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Аннотация: в статье рассмотрена модель адаптивного двигателя, отличительной особенностью которой является распределение воздуха между контурами. Обозначены основные проблемы адаптивного двигателя и способы их решения. Представлен сравнительный анализ с двигателем традиционной конструкции. Выявлена актуальность и необходимость формирования научного задела в данной области.
Ключевые слова: двигатель изменяемого цикла; изменяемая степень двухконтурности; адаптивный двигатель.

Введение

Повышение эффективности работы силовой установки, а именно создание двигателя, в котором параметры рабочего процесса будут стремится к идеальным во время полета, олицетворяют такие качества летательного аппарата, как много адаптивность и многофункциональность, которые востребованы, как в военной, так и в гражданской авиации. Особенно в военной авиации, так как всегда стоит проблема повышения эффективности работы силовой установки во всем эксплуатационном диапазоне.

Отличительной особенностью адаптивного авиационного двигателя на базе двухконтурного турбореактивного двигателя с форсажной камерой сгорания и смешением потоков (ТРДДФсм) является динамическое решение

одной из задач по созданию высокоэффективной силовой установки, а именно выбора оптимальных параметров рабочего процесса при проектировании. Так как при создании современных двигателей согласование условий и параметров рабочего процесса происходит только на одном или нескольких наиболее используемых режимах полета, а работа двигателя происходит в разных условиях, от минимального до полного форсажа, то, как следствие происходит рассогласование и подобранные значения параметронов работы компрессора, камеры сгорания и турбины становятся не оптимальны, что приводит к низкой эффективности работы двигателя.

Классификация схем двигателей изменяемого цикла

Воздушные реактивные двигатели изменяемого цикла можно разделить на следующие группы: технология адаптивного компрессора низкого давления, технология адаптивного газогенератора, технология управления степенью двухконтурности, технология дополнительных газогенераторов.

На рисунке 1 приведены схемы наиболее часто встречаемых вариантов исполнения данных компоновок.

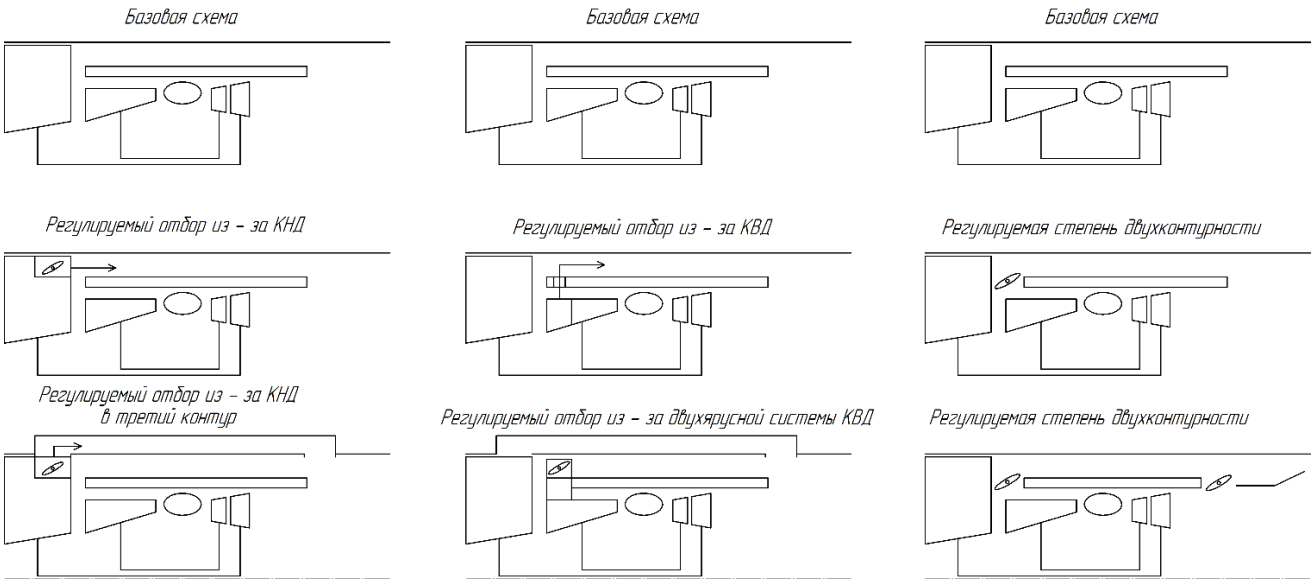


Рис. 1. Основные схемы адаптивного двигателя

Места отбора из проточной части двигателя могут быть в разных местах, а и места подачи воздуха находятся в каналах второго контура и третьего контурах, также возможна подача за критическим сечением сопла или в общую камеру смешения до критического сечения.

Основными преимуществами двигателей, реализующих способность изменения параметров цикла, является их адаптивность к непосредственно текущему условию эксплуатации. Как следствие из этого можно получить вариативность программ работы двигателя, направленных на экономичность или эффективность, а возможно и что-то другое в зависимости от требуемых или предъявленных условий.

К недостаткам в не зависимости от выбранной схемы двигателя можно отнести: усложнение конструкции и возможно увеличение массы двигателя, усложнение программы регулирования двигателя и управления летательным аппаратом, наличие дополнительных регулирующих элементов, в уже имеющиеся систему двигателя, сложность при проектирование подобных регулирующих элементов и влияние их на другие узлы двигателя, такие как компрессор, камеры сгорания, турбина, необходимость исследования течения по газодинамическому тракту двигателя в большем диапазоне изменения расхода воздуха и т.д.

Подобные компоновочные схемы воздушных газотурбинных двигателей призваны решить комплексную задачу по повышение экономичности двигателя и увеличению тяги. На данный момент подобные решения при проектировании двигателей активно прорабатываются, а в некоторых случаях даже реализуются.

Сравнительный анализ ТРДДФсм и адаптивного двигателя на его базе.

В качестве прототипа была выбрана силовая установка со следующими параметрами: температура газов перед турбиной $T_г$ = 1750 K и расход воздуха $G_в$ = 122 кг/с. Все параметры по узлам одинаковы для обеих моделей и выбраны, как наиболее подходящие в данном классе. На рис. 2 приведены схемы сравниваемых математических моделей, где 2 – базовый ТРДДФсм, а 1 – адаптивный двигатель на базе ТРДДФсм Адаптивный двигатель имеет регулируемую степень двухконтурности, а именно изменяемый расход воздух перед компрессором высокого давления, и отбор воздуха за первой ступенью.

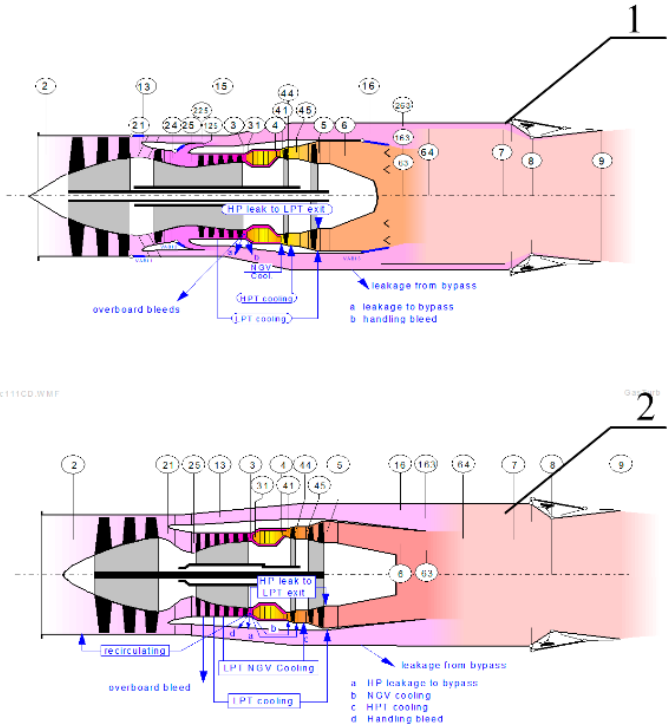


Рис. 2. Схемы сравниваемых математических моделей двигателей

Для сравнительного анализа были произведены термогазодинамические расчеты и построены скоростные характеристики. Выбраны основные сечения по высоты и скорости полета, представленные в табл. 1.

Таблица 2

Высоты и скорости полета

Форсажная камера	*H*, м	$M_П$
Выключена	11000	0,5…0,9
Включена	0	0…1,2

Зависимость основных параметром двигателя на крейсерской высоте H = 11000 метров и изменяющейся скорости $M_П$ = 0,5…0,9 представлены в виде графиков на рис. 3–5.

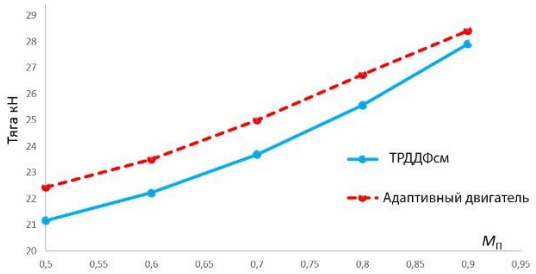


Рис. 3. Зависимость тяги от скорости

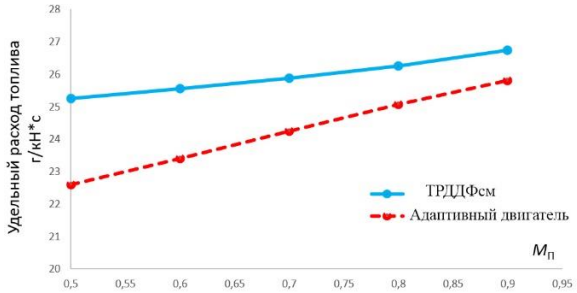


Рис. 4. Зависимость удельного расхода топлива от скорости

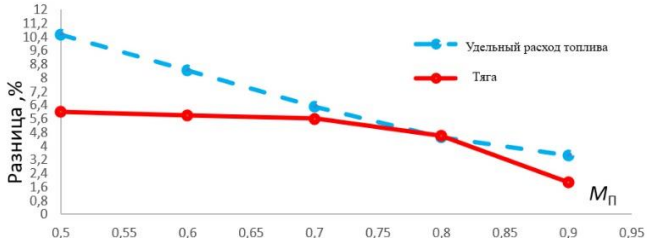


Рис. 5. Топливная и тяговая эффективность в процентах

В результате детального расчета двух моделей на крейсерском режиме можно сделать вывод о том, что адаптивный двигатель может реализовать большую тягу, по сравнению с ТРДДФсм и также при этом иметь меньший удельный расход по всему диапазону скорости, за счет сравнительно большому

увеличение степеней двухконтурности и их более правильному значению в зависимости от условий.

Зависимость основных параметром двигателя при высоте H = 0 метров и изменяющейся скорости $M_П$ = 0…1,2 представлены на рисунках рис. 6 – рис. 8.

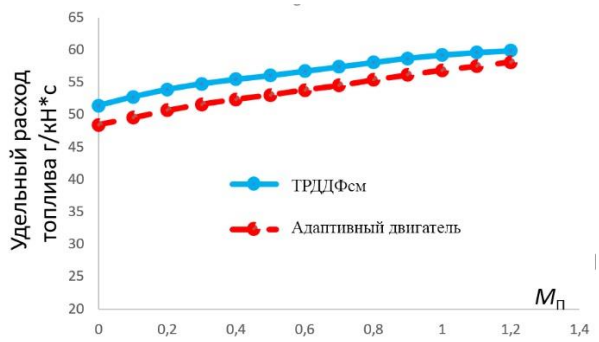


Рис. 6. Зависимость тяги от скорости

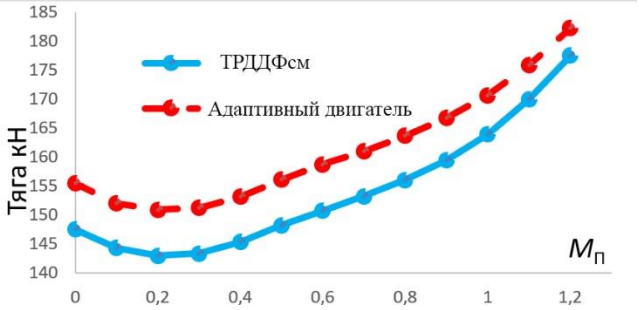


Рис. 7. Зависимость удельного расхода топлива от скорости

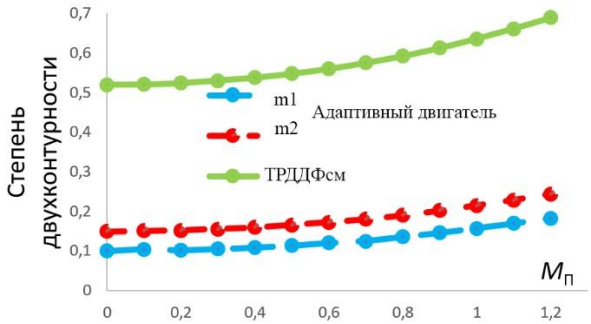


Рис. 8. Зависимость степени двухконтурности от скорости

В результате детального расчета двух моделей можно сделать вывод о том, что проектируемый двигатель может реализовать большую тягу, по сравнению с двигателем прототипом и также при этом иметь меньший удельный расход по всему диапазону скорости, за счет сравнительно меньшей степеней двухконтурности.

Максимальная топливная эффективность, в данных условиях расчета, проектируемого двигателя составила 6,12%, а минимальная 3,01%. При этом отбор воздуха за ступенью минимален и составляет не более 6 кг/с. Первая степень двухконтурности изменяется от 0,1 до 0,18, а вторая от 0,15 до 0,24.

Заключение

Таким образом адаптивный двигатель на крейсерском режиме полета оказывается более экономичным в среднем на 6,64%, а эффективность его в среднем выше на 4,76%, по сравнением с двигателем-прототипом. Адаптивный двигатель на взлете оказывается более экономичным в среднем на 4,94% и эффективным в среднем на 4,8%, по сравнением с двигателем-прототипом.

Адаптивный авиационный двигатель с изменяемой степенью двухконтурности эффективен во всем диапазоне высот и скоростей, поэтому развитие в этом направление является перспективным. В данной работе показано, что двигатель подобной схемы превосходит аналогичный ему, поэтому формирование научно-технической базы в этом направлении является неотъемлемой частью для создания перспективных двигателей будущего поколения.

Библиографический список

1. Богданов В.И., Дормидонтов А.К., Пьянков К.С., Топорков М.Н. Повышение лобовой тяги пульсирующего ВРД с многополосной камерой сгорания постоянного объёма// Вестник машиностроения. 2012. № 7. – С.35 – 39.

2. *Wave rotor topping cycles for gas turbine engines. NASA Glenn Research Center* [Электронный ресурс] / Режим доступа: *http://www.grc.nasa.gov.*

3. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных аппаратов и проблема тройных конфигураций ударных волн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016 – № 1. – С. 1–21. – т. 16.

4. Тарасов А.И. Щипаков В.А., Перспективы использования пульсирующих детонационных технологий в турбореактивных двигателях // Авиацонно-космическая техника и технология. – 2011 – № 9. – С. 46–50.

5. *Piotr Kalina., Turbine engine with detonation combustion chamber in institute of aviation // Journal of KONES Powertrain and transport, vol*. 21, *no*. 1, 2014, *pp* 119–124

© Субханкулов Т.Р., 2024

УДК 629.7.036.3

А.Р. СЫРЛЫБАЕВ
Aruzlan78timer@gmail.com
Науч. руководв. – ст.преподаватель Н.Б. СИМОНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ СТРИМЕРНОГО СВЧ-РАЗРЯДА ДЛЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в данной статье рассматривается процесс воспламенения топливно-воздушной смеси с использованием стримерных разрядов. Основное внимание

уделено механизмам образования стримеров и их взаимодействию с топливно-воздушной смесью. Представлены экспериментальные данные и теоретические модели, описывающие процессы распространения разрядов в различных условиях. Обсуждаются факторы, влияющие на эффективность воспламенения, такие напряженность электрического поля, время разряда и давление. Результаты исследований демонстрируют потенциал использования стримерных разрядов для повышения эффективности и стабильности воспламенения.

Ключевые слова: сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение; стримерный разряд; воспламенение; детонационное горение; топливная смесь.

Стримерный разряд – тип переходного электрического разряда, образующийся на поверхности электрода, несущего высокое напряжение в изолирующей среде (например, воздух).

В электрическом поле, превышающем диэлектрическую прочность среды, образуются разряды, направленные от электрода к среде. Диэлектрическая прочность воздуха равна 30 кВ/см при нормальном атм. давлении. Это поле ускоряет свободные электроны/ионы воздухе, которые в свою очередь при столкновении с соседними атомами выбивают из них электроны/ионы, вследствие возникает цепная реакция (разряд), сила и протяженность которого зависит от приложенного напряжения на электроде.

Применение для розжига смеси

Сотрудниками Московского Радиотехнического Института Российской Академии Наук (МРТИ РАН) был разработан и исследован способ инициирования в газе стримерного СВЧ-разряда (рис.1) в электромагнитном поле, энергия которого намного меньше энергии электрического пробоя газа (подкритические разряды).

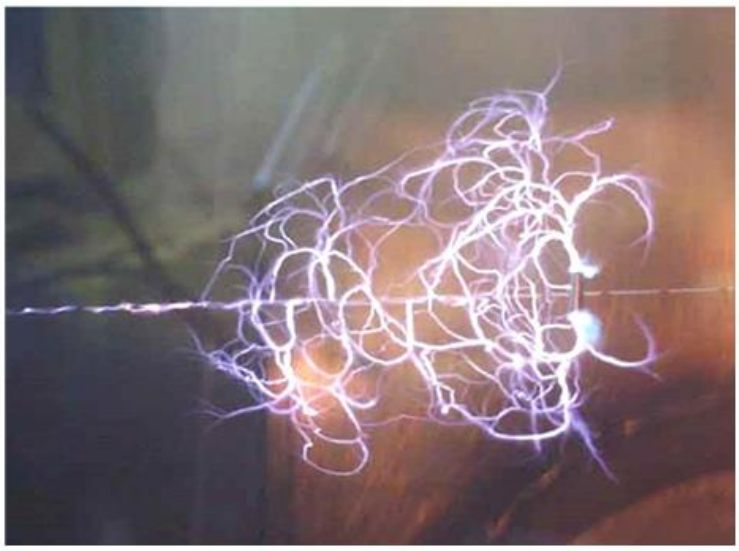


Рис. 1. Стримерный разряд

Ниже представлена схема установки для реализации этой цели. В центре помещался инициатор разряда, представлявший собой полуволновой электромагнитный вибратор. Он позволяет реализовать СВЧ разряд при атмосферном давлении воздуха. За счет резонанса уменьшается необходимая энергия поля для пробоя примерно в 600 раз. Вибраторы выполняются в виде цилиндров из хорошо проводящих металлов со сферически закругленными концами.

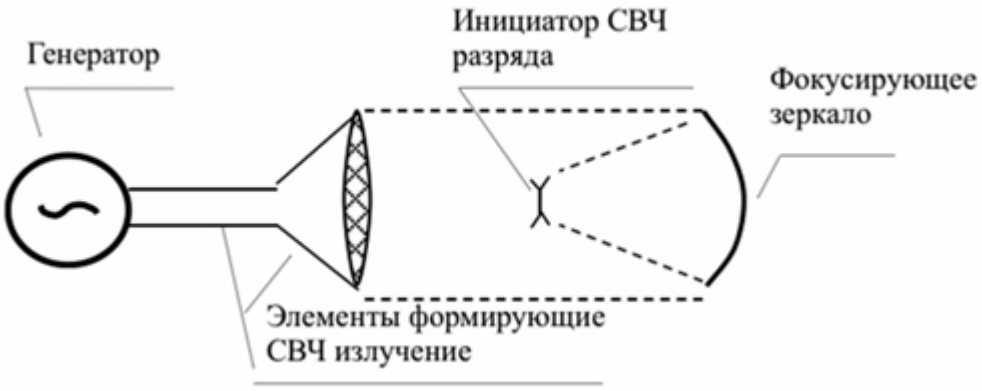


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для инициирования стримерного разряда

СВЧ генератор, генерирующий электромагнитные колебания с частотой $f \approx 3 \cdot 10^9$ Гц, или длинной волны $\lambda = 8{,}9$ см, при длительности СВЧ импульса $t_{имп} = 40$ мкс. Электромагнитные колебания распространяются по элементам, формирующим СВЧ пучок поперечным диаметром 60 см. Излучение поступает на фокусирующее зеркало, которое фокусирует эти колебания на инициаторе в пучок с поперечным разрезом около 10 см. В элементы, формирующие СВЧ излучение включен аттенюатор, который позволяет менять мощность СВЧ пучка P в диапазоне от 10^2 Вт до $\approx 10^6$ Вт. К самому инициатору прикреплен резиновый шарик диаметром около 10 см, наполненный смесью пропана и воздуха. При подаче импульса к инициатору подводится энергия около 1 Дж (максимальная располагаемая мощность импульса – порядка 1 МВт). Внутри шарика пробегает стримерный разряд, поджигающий смесь (рис. 3), из-за чего сам шар лопается. Для сравнения осуществлялось горение при помощи искрового зажигания с энергией 1 Дж.

Воспламенение смеси записывалось на скоростную камеру со скоростью 1,200 кадров/с. На рисунке 3 видно, что от очага воспламенения (область оранжевого цвета) распространяется диффузионный фронт горения, скорость которого порядка 1.5 м/с. «Горячие точки» не образуются и предпосылок для детонации нет.

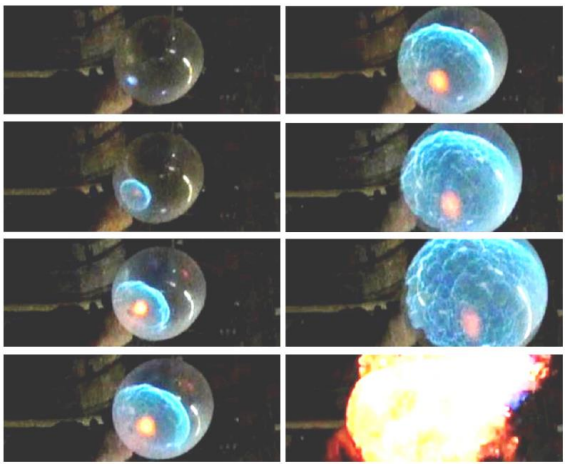


Рис. 3. Поджиг шарика с пропаном искровым зажиганием (1200 кадров/с)

В момент, когда шарик лопнул, произошел мощный выброс пламени, что говорит о не полностью сгоревшем пропане.

При стримерном инициировании горения скорость распространения фронта горения составляет на разных участках от 4 до 15 м/с, что в четыре раза быстрее, по сравнению с обычным искровым возгоранием. В результате самопересечений фронта образуются мощные волны сжатия (ярко голубые линии на рис. 4), а также множество «горячих точек», которые являются предпосылками для инициирования детонационной волны. Выброс пламени при взрыве шара отсутствует, что свидетельствует о практически полном сгорании пропана к этому моменту. Так же можно осуществить горение очень бедных смесей. Это очень полезно для реализации малоэмиссионных камер сгорания (КС).

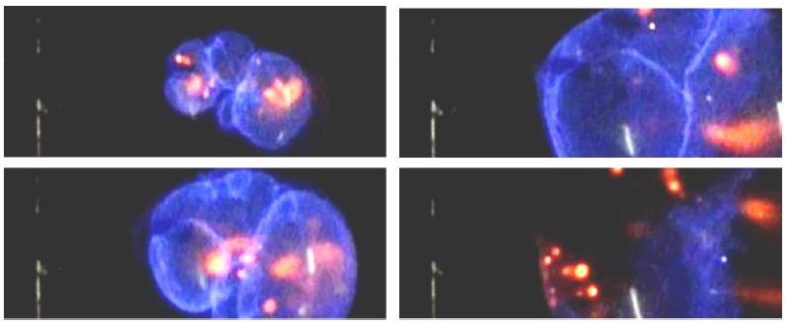


Рис. 4. Поджиг шарика с пропаном стримерным разрядом (1200 кадров/с)

Для детального исследования этот процесс возгорания был записан на камеру со скоростью съемки 69.000 кадров/с (рис. 5). На первом кадре видна вспышка стримерного разряда. На втором – развитие области горения. Фронт пламени имеет сложную форму, состоящую из множества языков пламени. В узлах фронта в большом количестве образуются «горячие точки». Их количество сначала быстро растет, а потом остается примерно постоянным до момента, когда шарик лопается. От «горячих точек» распространяются сильные волны сжатия, которые образуют новые узлы фронта пламени и новые «горячие точки».

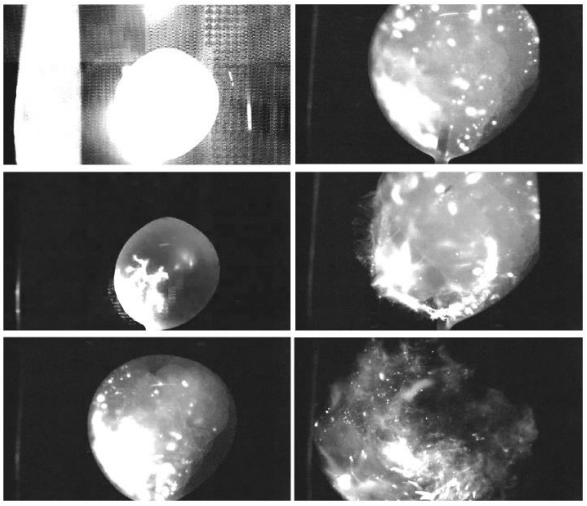


Рис. 5. Поджиг шарика с пропаном стримерным разрядом (69000 кадров/с)

Исследовалась возможность инициирования поверхностного разряда.

Для этого использовалась та же установка (рис. 2), но в схему помещались диэлектрические поверхности разной формы (рис. 6), на которые крепился инициатор.

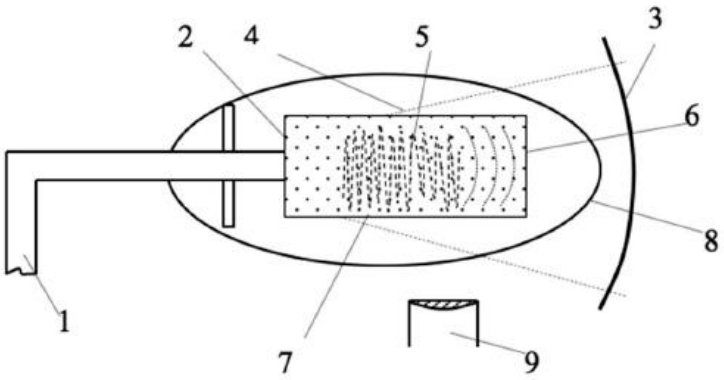
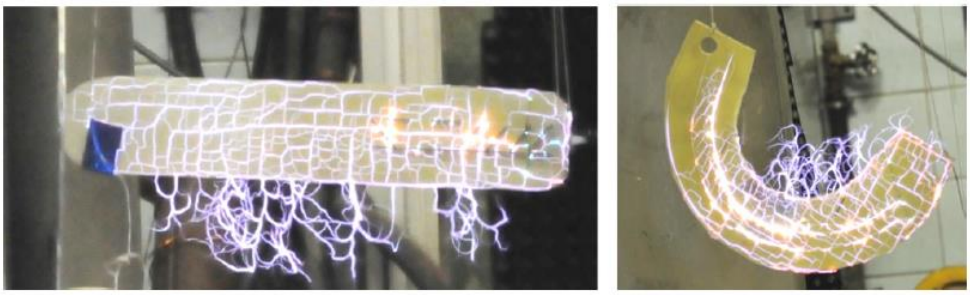


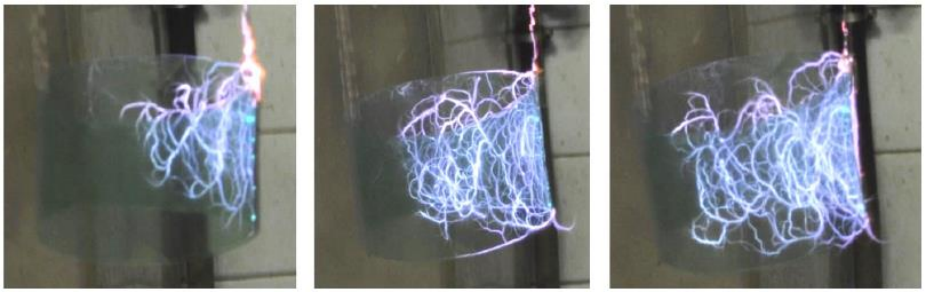
Рис. 6. Схема установки рабочей модели для исследования присоединенного стримерного разряда:

1 – Подача пропан-воздушной горючей смеси; 2 – Инициатор СВЧ разряда; 3 – Фокусирующее зеркало; 4 – СВЧ пучок; 5 – СВЧ разряд; 6 – Фронт пламени; 7 – Стеклотекстолитовая пластина; 8 – Тонкая радиопрозрачная оболочка; 9 – Фоторегистратор

Эксперименты показали, что стримерный разряд бежит навстречу возникновения ЭМ поля со скоростью 10–15 км/с, повторяя форму поверхности. Разряд можно зажечь как на поверхности плоского куска диэлектрика, так и на торце цилиндрической поверхности, и на внутренней поверхности цилиндра (рис. 7).



(а)



(б)

Рис. 7. Инициирование присоединенного стримерного СВЧ разряда на плоской (а) и вогнутой (б) поверхности

Скорость распространения разряда настолько велика, что поджигание смеси происходит сразу на всей поверхности, по которой пробегал разряд (рис. 8). Именно это и требуется для инициирования фронта детонации. На кадрах видно, что от плоской пластины распространяются в разные стороны прямолинейные фронты горения. Если по краям пластины поместить стенки, можно сконцентрировать эту силу взрыва (детонационного горения).

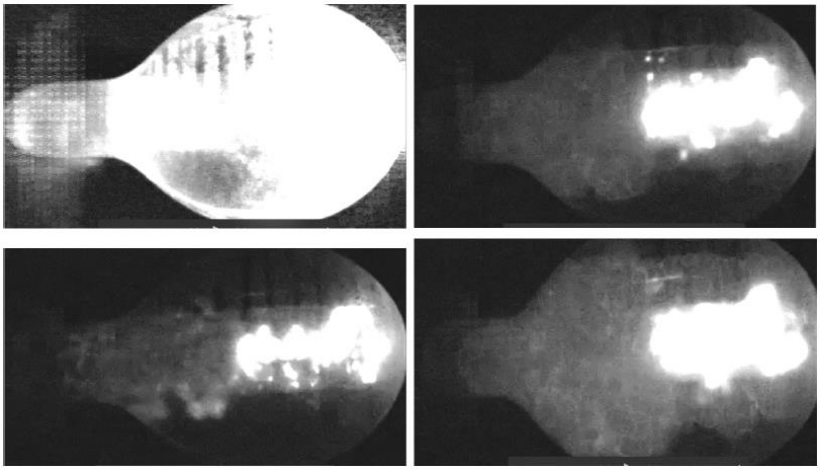


Рис. 8. Цилиндрический взрыв, инициированный стримерным разрядом, присоединенным к плоской пластине

Теперь можно сказать о некоторых ограничениях этой установки. На рисунке 9 ниже представлены области существования СВЧ разрядов в зависимости от напряженности поля E_0 и давления p среды.

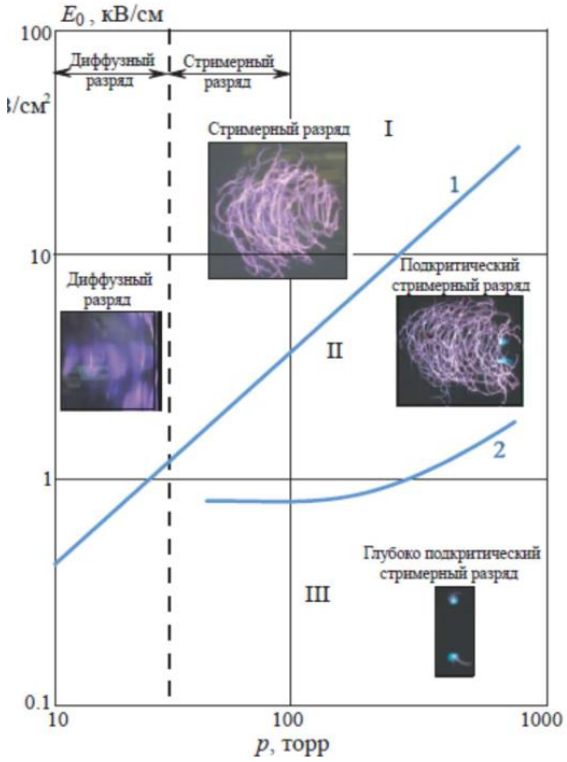


Рис. 9. Области существования различных типов СВЧ разряда при длине волны излучения 8,9 см

Область I надпробойных значений поля лежит выше линии 1, где реализуется неинициированный разряд. Линия 1 соответствует значениям критического поля с $E_{C(p)}$. Область подкритических разрядов лежит ниже линии 1. При низких давлениях воздуха разряд является диффузным. При больших давлениях (при p > 20 торр) он реализуется в стримерной форме. Эти разряды имеют вид системы плазменных каналов, которые с высокой эффективностью поглощают энергию возбуждающей разряд волны. В результате, температура газа отдельных участков плазменных каналов достигает нескольких тысяч градусов. Стримерные разряды инициируются в полях при E0 < Ec (подкритический разряд) и $E_0 << E_c$ (глубоко подкритический разряд).

Глубоко подкритические разряды не могут отрываться от инициатора, поэтому они выглядят как пучок света.

Из рис. 9 следует, что при p = 300 торр и $E_0 > 10^4$ В/см реализуется надкритический стримерный разряд. При $10^4 > E_0 > 2x10^3$ В/см реализуется инициированный подкритический стримерный разряд с развитой объемной структурой. При $E_0 < 2 \cdot 10^3$ В/см реализуется инициированный глубоко подкритический микроволновый разряд, привязанный к концам инициатора. Подкритические разряды практически реализуются только в импульсном режиме работы генераторов с характерной длительностью импульса в единицы или десятки микросекунд. Глубоко подкритические разряды в непрерывном режиме горения реализуются при мощностях порядка нескольких киловатт.

Основные эксперименты выполняются с вибратором из алюминия с длиной 4 см и диаметром 0.5 см при давлениях p = 150, 300, 450 и 600 торр. В результате при различных p и E0 получен набор фотографий при различных значениях времени импульса разряда. Фотографии для вибратора при p = 300 торр и $E_0 = E_{0b}$ (минимальное поле, при котором поле на вершине вибратора $E_p = E_b$, что обеспечивает инициацию разряда) приведены на рис. 10 для различных времен разряда. При $E_0 = E_{0b} = 1$ испарение наблюдается только на боковой поверхности вибратора при tимп = 40 мкс. При данной длительности разряда оно носит случайный характер в отдельных импульсах. Испарение наблюдается только тогда, когда стример с вершины вибратора касается его боковой поверхности, что происходит не в каждом импульсе. При tимп < 40 мкс в экспериментах испарения не происходит.

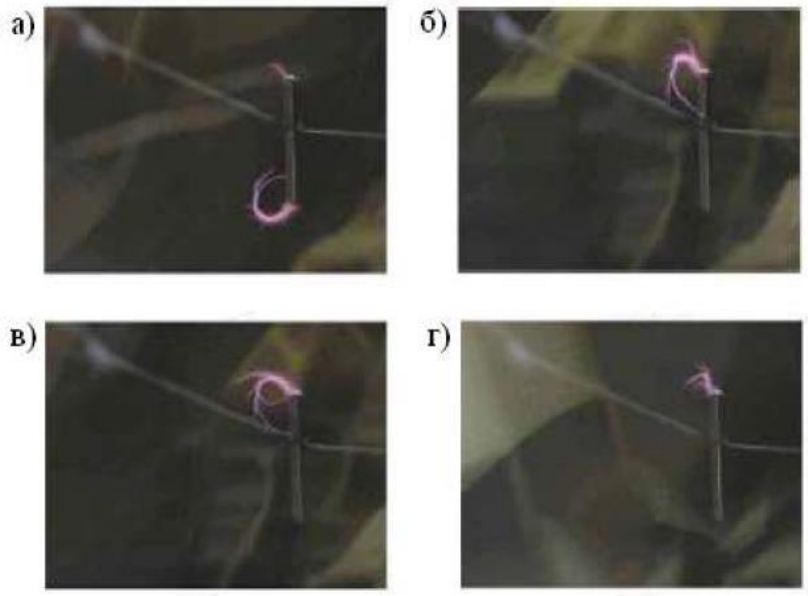


Рис. 10. Присоединенный разряд при p = 300 торр, $E0$ = E0b и tимп = 40 мкс (а), 38 мкс (б), 36 мкс (в), 34 мкс (г)

При $E_0 = E_{0b} = 2$ до $t_{имп}$ = 25 мкс испарение наблюдается как на вершине, так и на боковой поверхности, но на боковой поверхности оно случайно. При изменении tимп от 24 до 5 мкс испаряется только вершина в каждом импульсе. В интервале от $t_{имп}$ = 4 до 3 мкс вершина испаряется тоже случайно. При меньших длительностях разряда испарения уже не происходит.

На рисунке 11 в качестве примера приведен набор фотографий при p = 600 торр, $E_0 = E_{0b}$ и $t_{имп}$ = 12 мкс. В опытах испарение материала поверхности инициатора наблюдается или на его вершинах в месте старта стримерных каналов, или на боковой поверхности инициатора в месте касания ее стримером, или в обоих местах. Испарение на вершине либо сплошное, либо точечное.

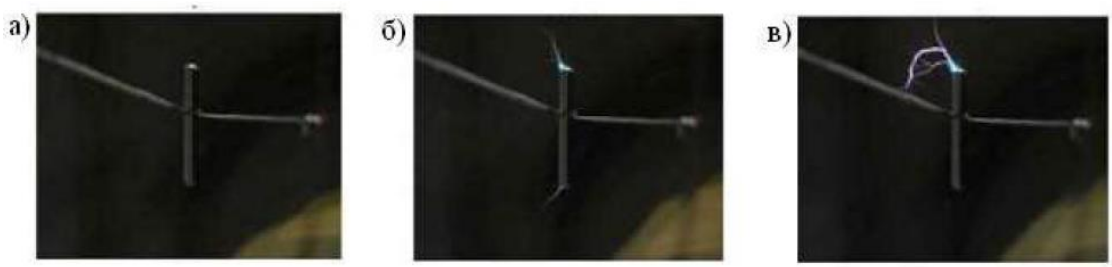


Рис. 11. Присоединенный разряд при p = 600 торр, E0 = E0b и тимп = 5 мкс (а), 8 мкс (б), 12 мкс (в)

При 12 мкс > $t_{имп}$ > 6 мкс разряд испаряет только точечно вершину. При тимп = 5 мкс испарение не регулярно. При меньших длительностях СВЧ импульса разряд не осуществляет поджиг горючей смеси.

Фотографии разряда при давлении p = 300 торр приведены на рис. 12. На рис. 12, а показан разряд, при котором происходит сплошное испарение вершины ($E_0 = E_{0b}$ = 2, $t_{имп}$ = 40 мкс). На рис. 12, б показан разряд, при котором происходит точечное испарение только боковой поверхности ($E_0 = E_{0b}$ = 1.5 , $t_{имп}$ = 36 мкс). Испарение как на вершине, так и на боковой поверхности, приведена на рис. 12, в (p = 300 торр, $E_0 = E_{0b}$ = 2 и тимп = 40 мкс). На рис. 12, г представлено точечное испарение вершины ($E_0 = E_{0b}$ = 2 и $t_{имп}$ = 7 мкс).

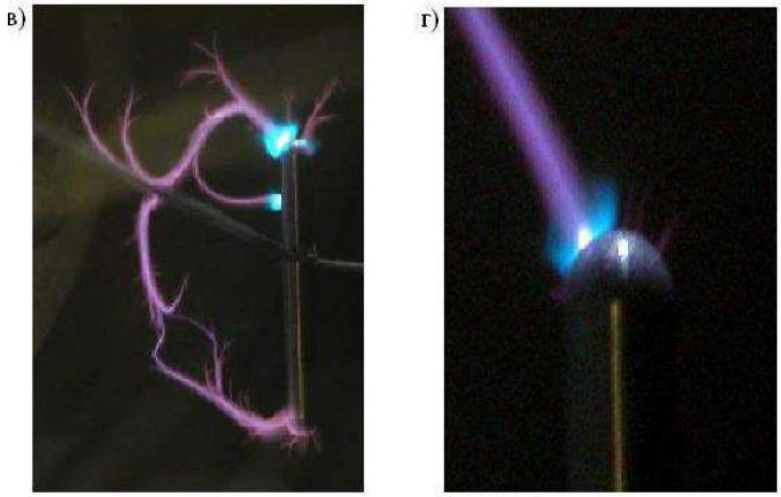


Рис. 12. (а) – испарению металла на вершине, (б) – точечное испарение на боковой поверхности, (в) – испарение на вершине и боковой поверхности, (г) – испарение на вершине в месте контакта со стримером

Экспериментальная зависимость $t_{имп}$ от $E_0 = E_{0b}$ при давлении p = 300 торр приведена на рис. 13. Она показывает, какую длительность импульса необходимо обеспечить при данном поле, чтобы была определенная вероятность поджига пропано-воздушной смеси. Как видно, поджиг обеспечивается, начиная с $E_0 = E_{0b}$ = 2 и с $t_{имп}$ = 5 мкс.

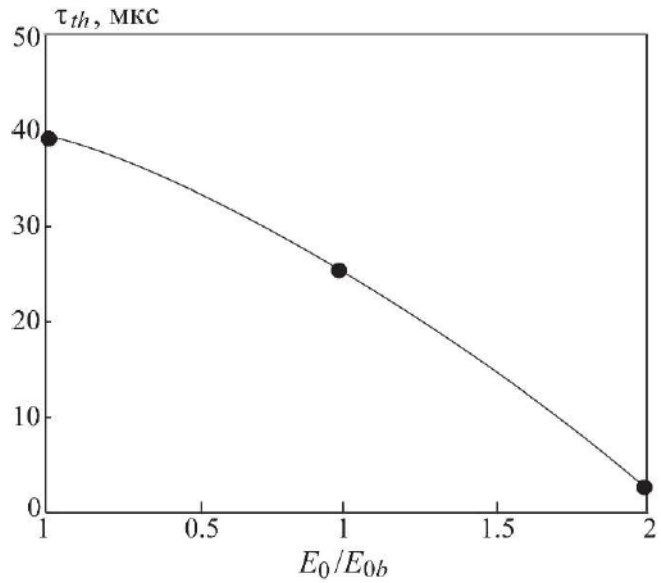


Рис. 13. Экспериментальная зависимость tимп.мин от *E*0/*E*0b при *p* = 300 торр

Пусть во время экспериментов выяснили при каких значениях *м*имп можно избегать частично или полностью испарения инициатора, но при тех же экспериментах выяснили, что смесь поджигается только в том случае, когда за время разряда температура достигает температуры испарения материала инициатора. Так что время импульса, необходимое для возгорания смеси, тоже ограничено.

Заключение

По полученным экспериментальным результатам можно сделать вывод, что применение стримерного разряда вместо искрового способа для воспламенения горючей смеси является наиболее перспективным ввиду возможности реализации детонационного горения. Смесь можно поджигать практически моментально на относительно большой площади при использовании диэлектрических поверхностей. Всё это может увеличить коэффициент полезного действия (КПД) и уменьшить размеры камер сгорания.

Но при этом необходимо решить некоторые сложные задачи идеи использования стримерных разрядов:

– оптимизация конструкции установки инициации СВЧ разрядов и внедрение ее в камеру сгорания;

– уменьшение энергозатрат или увеличение КПД этой установки;

– предотвращение испарения материала инициатора с сохранением возможности воспламенения смеси, или же поиск материала для инициатора, способного выдерживать высокие температуры и обладающего хорошей электропроводностью.

Библиографический список

1. Стариковская С.М., Александров Н.Л., Косарев И.Н., Киндышева С.В., Стариковский А.Ю. Воспламенение с помощью низкотемпературной плазмы. Кинетический механизм и экспери ментальная проверка // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43. № 3. С. 259–265.

2. *Starikovskiy A., Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion // Progress in Energy and Combustion Science*. 2013. Vol. 39. *Pp*. 331–368.

3. Васильева О.Б., Кумкова И.И., Кузнецов В.Е., Рутберг А.Ф., Сафронов А.А., Ширяев В.Н. Возможности применения плазменных технологий для переработки органосодержащих веществ. Влияние формы кривой напряжения на режим работы плазмотрона // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 43. № 4. С. 494–499.

4. Чернышев С.Л., Скворцов В.В., Иванов В.В., Трощиненко Г.А. Концепция создания и приме нения объемноцентрированного неравновесного разряда для поджига и интенсификации горе ния топлив в высокоскоростных потоках // Авиационная промышленность. 2013. № 2. С. 19–25.

5. *Ju Y., Sun W. Plasma assisted combustion: dynamics and chemistry // Progress in Energy and Com bustion Science*. 2015. Vol. 48. *Pp*. 21–83.

6. *Adamovich I.V., Lempert W.R. Challenges in understanding and predictive model development of plasma-assisted combustion // Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2015. *Vol.* 57. *No*. 1. 014001 (12 *pages*).

7. Сторожев Д.А., Суржиков С.Т., Куратов С.Е. Анализ кинетических процессов в тлеющем раз ряде в молекулярном водороде //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 6. *http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-6/articles/267/*

8. Суржиков С.Т. Расчетное исследование параметров аномального тлеющего разряда на поверх ности обтекаемой газом пластины //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т.23, вып. 3. *http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-3/articles/1006/.*

9. Булат П.В. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных аппаратов и проблема тройных конфигураций ударных волн. Часть I – Исследования детонационных двигателей / П.В. Булат, П.В. Денисенко, К.Н. Волков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16. – С. 1–21. 2.

10. *Bulat P.V., Uskov V.N. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interac tion gasdynamic discontinuities / P.V. Bulat, V.N. Uskov // Life Science Journal*. – 2014. – 11, 8s. – 307–10 P. – *URL* : *www.lifesciencesite.com/lsj/life1108s/068_ 24921life1108s14_307_310.pdf*

© Сырлыбаев А.Р., 2024

УДК 629.7.036.3

Ф.Р. ХАМАТНУРОВ
hamatnuroff.filus@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. А.Е. КИШАЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ВЫСОТНОГО ДОЗВУКОВОГО РАЗВЕДЧИКА М-55 «ГЕОФИЗИКА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ «АМ»

Аннотация: в статье описан функционал системы поддержки принятия решений (СППР) «АМ» для проектирования авиадвигателей. Приведены результаты расчета проектируемого двигателя для модернизации высотного разведчика М-55 «Геофизика».

Ключевые слова: СППР «АМ»; М-55 «Геофизика», авиационный двигатель.

На сегодняшний день автоматизированные системы расчета и моделирования в разработке авиационных двигателей играют ключевую роль в обеспечении эффективности и надежности конечного результата. На ранних этапах проектирования важно оценивать различные варианты материалов и конструкций, чтобы сделать оптимальный выбор, который будет соответствовать всем требованиям и задачам. В настоящее время широко используются прикладные программы, позволяющие оптимизировать процессы расчета, произвести подбор конструктива и материалов с требуемыми свойствами. Одной из таковых является система поддержки принятия решений (СППР) «АМ» [1], [2], [3], которая позволяет анализировать и сравнивать различные параметры и характеристики материалов при проектировании авиадвигателя, а также предсказывать их поведение в различных условиях эксплуатации. Эта система позволяет проводить комплексный анализ различных вариантов материалов и конструкций, учитывая множество факторов, включая механические, термические и аэродинамические характеристики.

Топологическая модель двухконтурного турбореактивного двигателя со смешением потоков (ТРДДсм) в СППР «АМ» представляет собой сложную систему, которая включает в себя несколько уровней и компонентов. На первом уровне анализа рассматриваются основные характеристики материалов, такие как прочность, жесткость, теплопроводность и другие. На втором уровне анализа оцениваются конструктивные особенности деталей и их влияние на работу двигателя в целом. На третьем уровне анализа проводится комплексный

анализ всех факторов, включая взаимодействие между различными компонентами двигателя и внешними условиями эксплуатации.

СППР «АМ» использует экспертную систему по выбору материалов основных деталей авиационных воздушнореактивных двигателей, которая позволяет анализировать и сравнивать различные материалы на основе их характеристик и требований к двигателю. Система основана на базе данных, которая включает в себя информацию о различных материалах, их свойствах и поведении в различных условиях. Помимо традиционных материалов, система также позволяет рассматривать использование композитных материалов для рабочих лопаток компрессоров.

В данной работе приведены результаты расчета параметров двигателя для высотного разведчика М-55 «Геофизика», выполненные в системе программного обеспечения «АМ», с учетом теплового и газодинамического анализа для оптимизации основных характеристик авиадвигателя.

На первом этапе решения задачи была составлена топологическая модель ТРДДсм (рис. 1) и проведен термогазодинамический расчет с оптимизацией параметров проектируемого двигателя.

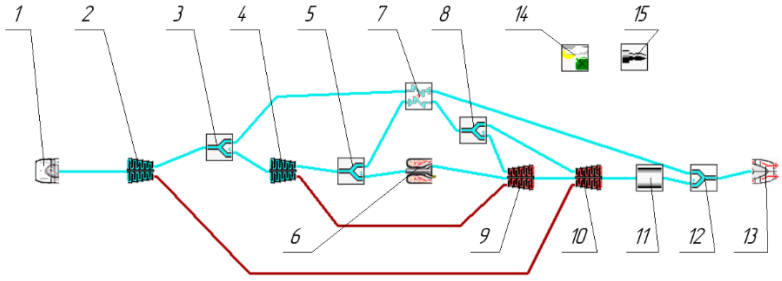


Рис. 1. Топологическая модель ТРДДсм:
1 – входное устройство; 2 – компрессор низкого давления (КНД); 3 – отбор воздуха на наружный контур; 4 – компрессор высокого давления (КВД); 5 – отбор воздуха на охлаждение лопаток турбины; 6 – основная камера сгорания (ОКС); 7 – теплообменник «газ-газ»; 8 – распределение охлаждающего воздуха между турбиной высокого давления (ТВД) и турбиной низкого давления (ТНД); 9 – ТВД; 10 – ТНД; 11 – канал; 12 – смеситель; 13 – выходное устройство; 14 – начальные условия; 15 – общие результаты

На основании термогазодинамического расчета были определены основные параметры узлов проектируемого двигателя, на основании которых было проведено формирование его конструктивного облика. Составленная в СППР «АМ» топологическая модель ТРДДсм приведена на рисунке 2.

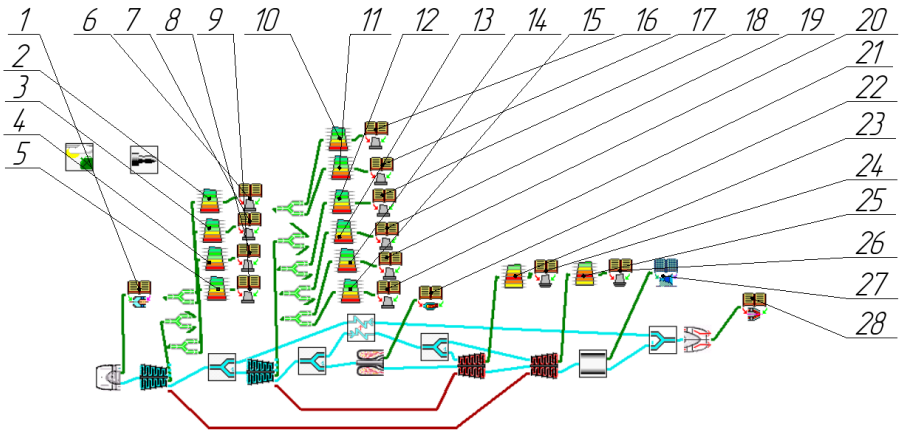


Рис. 2. Топологическая модель ТРДДсм в СППР «АМ»:
1 – модуль материала входного устройства; 2–5 – модули прочности лопаток ступеней КНД; 6–9 – модули материалов лопаток ступеней КНД; 10–15 – модули прочности лопаток ступеней КВД; 16-21 – модули материалов лопаток ступеней КВД; 22 – модуль материала ОКС; 23 – модуль прочности лопатки ТВД; 24 – модуль материала лопатки ТВД; 25 – модуль прочности лопатки ТНД; 26 – модуль материала лопатки ТНД; 27 – модуль материала переходного канала; 28 – модуль материала выходного устройства

Результат проведенного расчета в виде конструктивного облика основных узлов проектируемого двигателя приведен на рисунках .

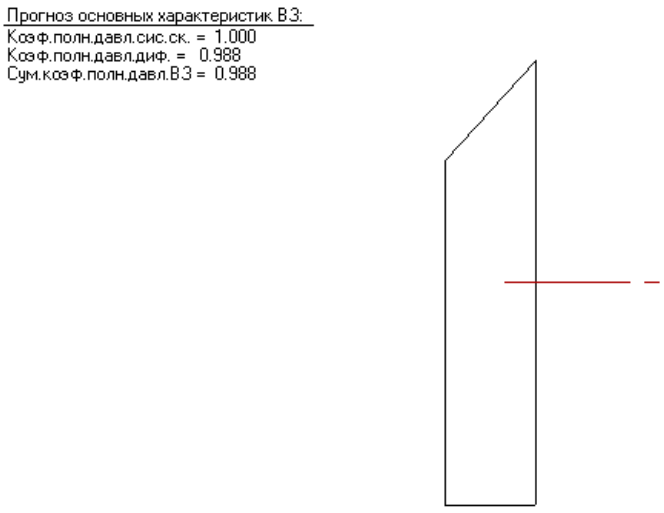


Рис. 3. Спроектированная при помощи СППР «АМ» геометрия воздухозаборника

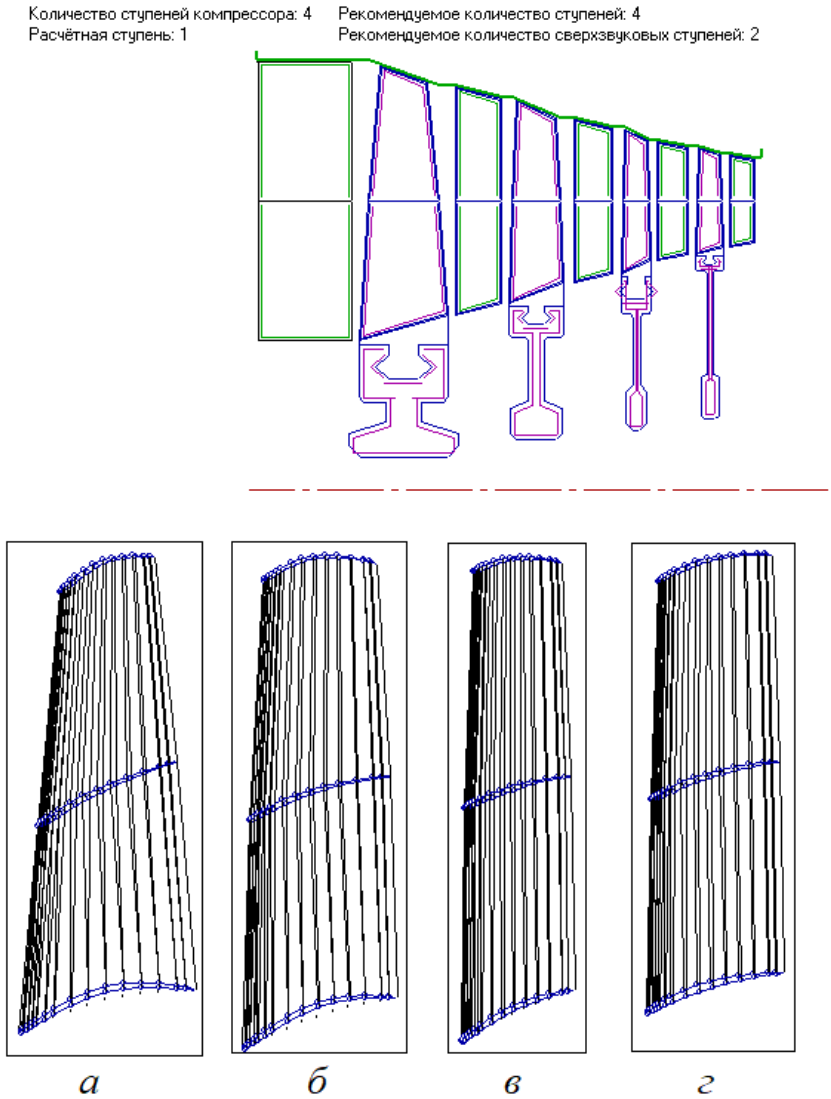
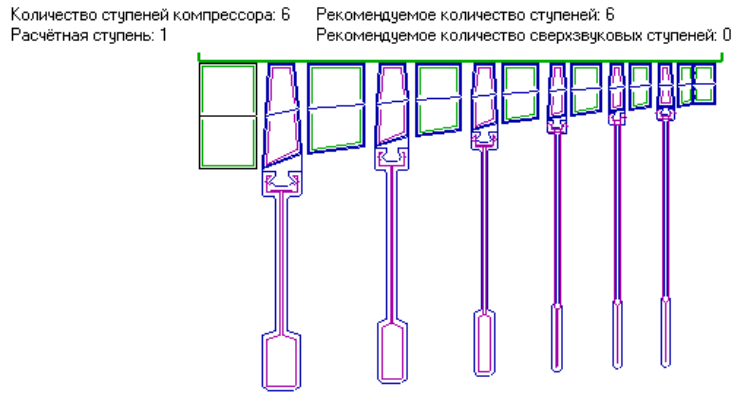


Рис. 4. Спроектированные при помощи СППР «АМ» геометрия проточной части и рабочей лопатки (РЛ) рабочего колеса (РК) КНД:
а – геометрия РЛ РК 1-й ступени КНД; *б* – геометрия РЛ РК 2-й ступени КНД;
в – геометрия РЛ РК 3-й ступени КНД; *г* – геометрия РЛ РК 4-й ступени КНД



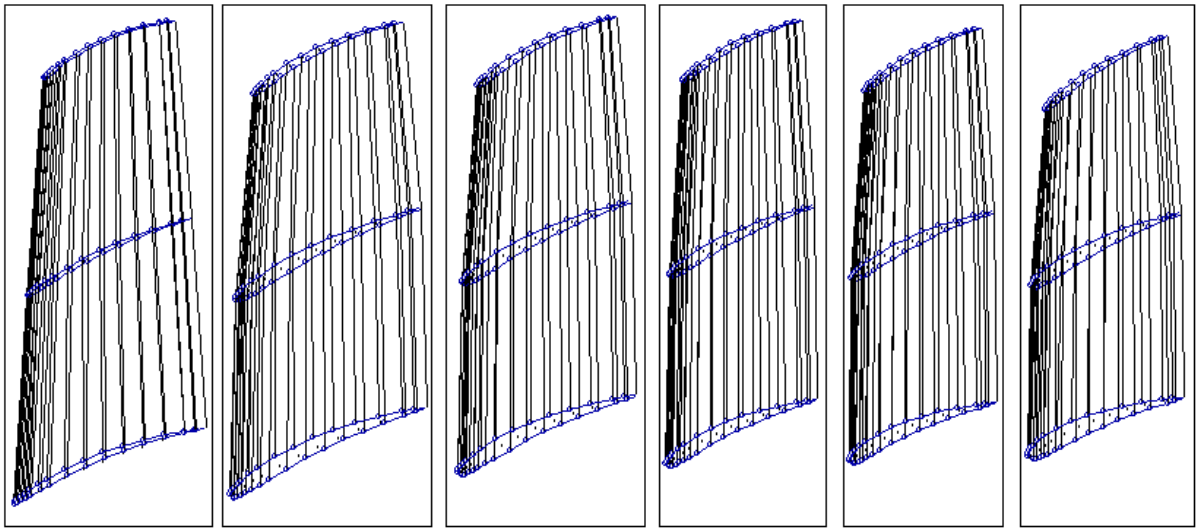


Рис. 5. Спроектированные при помощи СППР «АМ» геометрия проточной части и РЛ РК КВД:
а – геометрия РЛ РК 1-й ступени КВД; *б* – геометрия РЛ РК 2-й ступени КВД;
в – геометрия РЛ РК 3-й ступени КВД; *г* – геометрия РЛ РК 4-й ступени КВД;
д – геометрия РЛ РК 5-й ступени КВД; *е* – геометрия РЛ РК 6-й ступени КВД

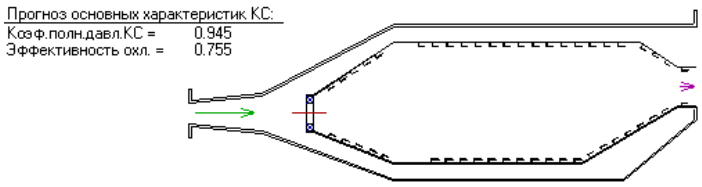


Рис. 6. Спроектированная при помощи СППР «АМ» схема ОКС

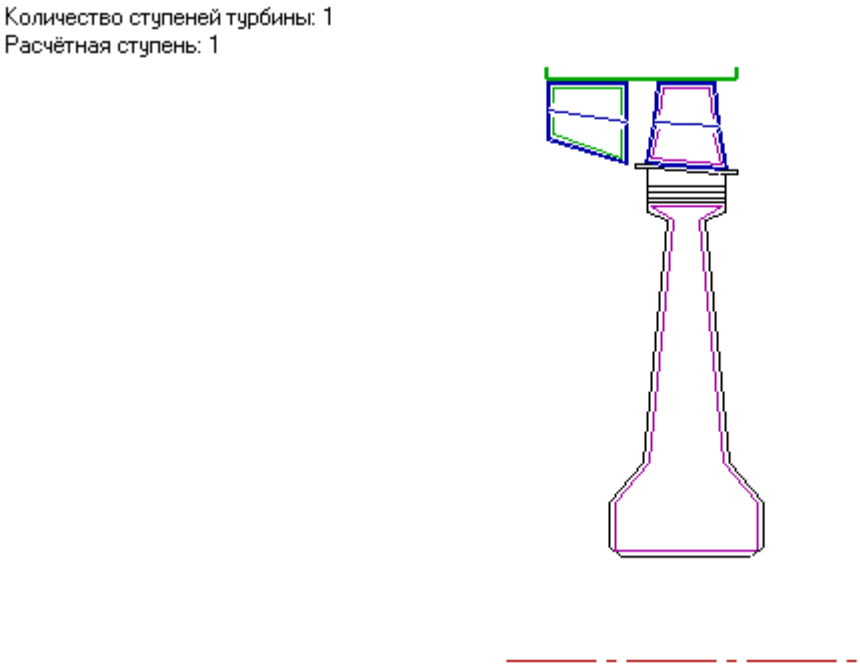


Рис. 7. Спроектированная при помощи СППР «АМ» геометрия проточной части ТВД

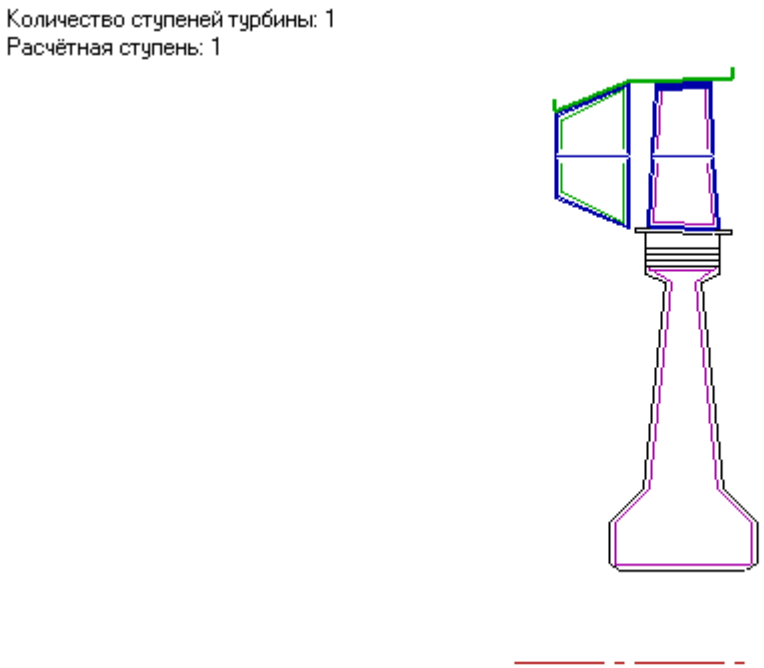


Рис. 8. Спроектированная при помощи СППР «АМ» геометрия проточной части ТНД

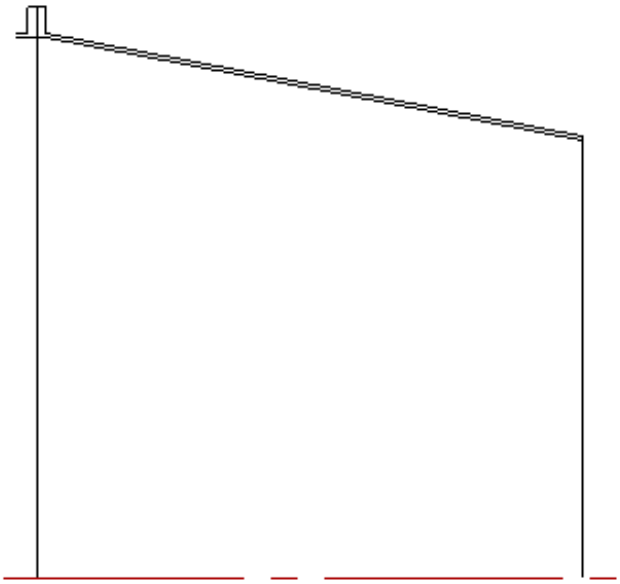


Рис. 9. Спроектированная при помощи СППР «АМ» геометрия выходного устройства

Таким образом, с применением СППР «АМ» было проведено формирование предварительного конструктивного облика ТРДДсм для высотного дозвукового разведчика М-55 «Геофизика». На основании полученных результатов возможно дальнейшее формирование конструкции рассматриваемого АД с применением математических моделей более высокого порядка.

Библиографический список

1. Экспертная система по выбору материалов основных деталей авиационных воздушнореактивных двигателей (свидетельство об официальной регистрации) // А.Е. Кишалов и др.: Св-во об официальной регистрации № 2014610727. М.: Роспатент, 2014.

2. Кишалов АЕ., Маркина К. В. Экспертная система по автоматизированному проектированию узлов и выбору материалов основных деталей авиационных воздушнореактивных двигателей: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016663846. Заявка № 2016619904. Дата поступления 22.09.2016. Дата регистрации 19.12.2016. М.: Роспатент, 2016.

3. . Кишалов А.Е., Липатов В.Д., Соловьев П.В. Система анализа и проектирования композиционных элементов проточной части авиационного двигателя: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664604. Заявка № 2020663589. Дата поступления 03.11.2020. Дата регистрации 16.11.2020. М.: РОСПАТЕНТ, 2020.

© Хаматнуров Ф.Р., 2024

УДК 621.45.034

П.Д. ЧЕГОДАЕВА
p.d.chegodaeva@gmail.com
Науч. руковод. – канд. техн. наук, проф. А.Е. КИШАЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СЕКЦИИ ЖТ КС АЛ-31СТ

Аннотация: проектирование КС современных ГТУ связано с взаимно противоречивыми требованиями, такими как надёжность, экономичность, малые габариты и низкие выбросы вредных веществ. Современные технологии 3D-численного термогазодинамического моделирования могут частично заменить эксперименты, но для их уверенного применения необходима верификация моделей. В статье изучаются процессы плёночного охлаждения в жаровой трубе камеры сгорания ГТУ с использованием 3*D* моделирования. Результаты моделирования сравнены с результатами расчётов по инженерной методике.

Ключевые слова: жаровая труба; камера сгорания; эффективность охлаждения; газотурбинный привод.

Наземные энергетические установки (ЭУ) на базе конвертированных авиационных двигателей широко применяются благодаря высокой мощности и компактности. Тенденции развития ЭУ показывает, что для повышения коэффициента полезного действия (КПД) и, соответственно, конкурентоспособности ГТУ, происходит постоянное улучшение эффективности основных узлов и повышение температуры на выходе из камеры сгорания (КС). Это создает значительные тепловые нагрузки на стенки жаровой трубы (ЖТ), требуя интенсивного охлаждения, так как допустимые температуры материалов ЖТ и лопаток турбин ниже рабочих температур газа.

Основные теоретические сведения

Существует несколько способов охлаждения нагретых частей ГТУ, наиболее распространенным из которых является послойное конвективно-плёночное охлаждение [4]. Оно предполагает создание тонкой пленки охлаждающего воздуха на внутренних стенках ЖТ через специальные отверстия. Охлаждающий воздух отводит тепловую энергию и образует защитную пленку, предотвращая прямой контакт горячих газов с материалом ЖТ. Это позволяет значительно увеличивать рабочую температуру материала без уменьшения ресурса и надежности конструкции.

В данном исследовании рассмотрены две методики оценки эффективности пленочного охлаждения. 3D-численное термогазодинамическое

моделирование в программном комплексе *ANSYS CFX* 22*R*1 и инженерная методика, описанная в книге А. Лефевра [1]. В качестве объекта исследования выбрана одна из секции ЖТ КС современной газотурбинной установки (ГТУ) АЛ-31СТ (рис. 1).

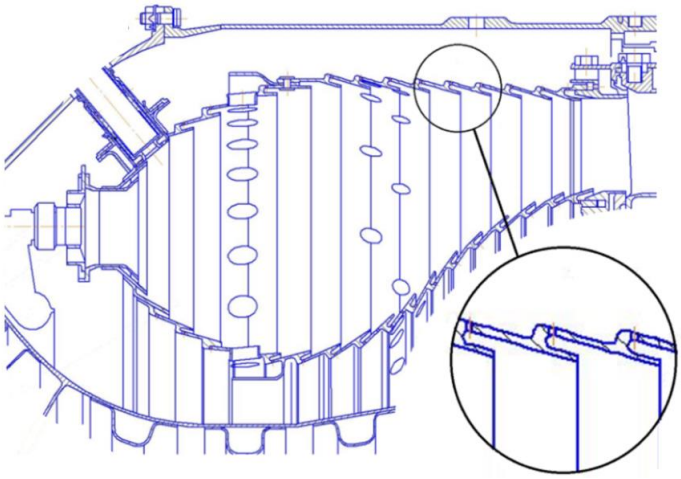


Рис. 1. Исследуемый фрагмент секции ЖТ

При этом, методика [1] предназначена для расчёта секций ЖТ у которых отверстия охлаждающего воздуха расположены по направлению течения вторичного воздуха, а в рассматриваемой секции ЖУ – поперёк (при расположении отверстий по направлению течения располагаемый перепад давления на отверстии включает в себя динамическое давление набегающего потока). Поэтому методика [1] была скорректирована соответствующим образом (рис. 2).

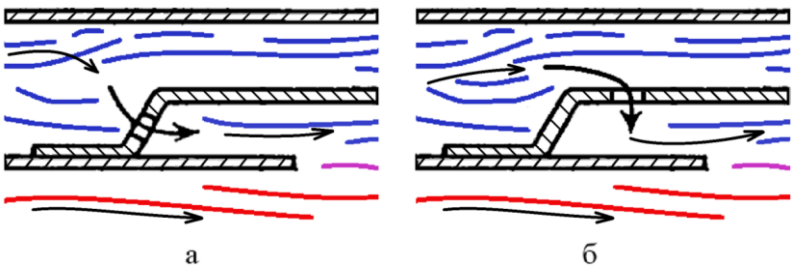


Рис. 2. Схема модели:
а) отверстие по направлению течения, б) отверстие поперёк направления течения

Описание расчетной модели

Схема расчётной области секции ЖТ представляет собой твердую стенку, выполненную из жаропрочного сплава ЭП-648 длиной $x = 20$ мм и толщиной $t = 1{,}2$ мм, обтекаемую с двух сторон: горячим газом внутри ЖТ и охлаждающим воздухом снаружи (рис. 3). Температура вторичного воздуха снаружи ЖТ ($T_{нар}$) принята равной 700 К, температура газов внутри ЖТ ($T_{внут}$) – 2000 К. Скорость вторичного воздуха ($W_{нар}$) принята равной 40 м/с, скорость газа ($W_{внут}$) – 50 м/с, что соответствует номинальному режиму работы ГТУ в

стандартных условиях. Для исследования характеристик секции ЖТ при различной эффективности плёночного охлаждения и, соответственно, размытия пленки на различной длине, в исследовании изменялось давление на выходе из расчётной области для вторичного воздуха ($p_{нар}$) (имитация изменения режима работы установки). Давление внутри ($p_{внут}$) принято постоянным и равным 1701000 Па. При моделировании учитывался конвективный теплообмен, влиянием лучистого теплообмена на температуру исследуемой секции ЖТ пренебрегалось. Исследуемая часть ЖТ осесимметрична, поэтому моделировался сектор расчётной области с углом 5˚ (рис. 4).

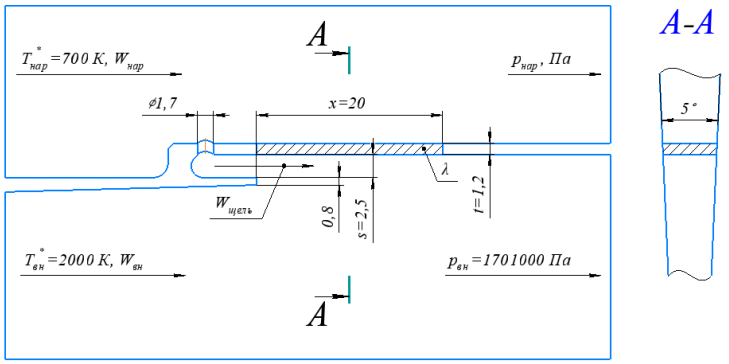


Рис. 3. Расчетная область секции ЖТ

При моделировании учтено изменение теплофизических свойств рабочего тела (вторичный воздух и продукты сгорания внутри ЖТ) и теплопроводность стенки секции ЖТ в зависимости от температуры (табл. 1). Принято, что снаружи ЖТ протекает чистый охлаждающий воздух, а внутри ЖТ – продукты сгорания, для которых $\alpha \sim 1$.

Динамическая вязкость рабочего тела определялась при помощи корреляции:

$$\mu = 4{,}22 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{1000}\right)^{0{,}83} [1 + 0{,}25 \exp(-0{,}7 \cdot \alpha)], \frac{\text{кг}}{\text{м с}}.$$

Таблица 1

Теплопроводность стенки в зависимости от температуры

Температура, ℃	200	300	400	500	600	700	800	900
Теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{м·℃}}$	14,6	15,4	16,7	18,4	19,7	21,8	23,9	26,0

Инженерный расчет

Расчет по первой методике [1] включает в себя определение эффективности охлаждаемой пленки и последующее численное решение системы уравнения теплового баланса, записанного для цилиндрической

стенки. Давление вторичного воздуха на выходе из расчётной зоны изменялось от 1,708 до 1,716 МПа.

Эффективность плёночного охлаждения определялась по формуле:

$$\eta = 3{,}4\left[\frac{x}{s}\left(1 - \frac{W_{\text{щель}}}{W_{\text{вн}}}\right)\right].$$

Температура плёнки охлаждающего воздуха вблизи внутренней стенки ЖТ:

$$T_{\text{ст ад}} = T_{\text{вн}} - \eta\left(T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}\right).$$

Связь температуры стенок внутри и снаружи выражается формулой:

$$K_{1-2} = \frac{\lambda}{t}(T_{\text{ст вн}} - T_{\text{ст нар}})$$

Конвективный тепловой поток к внутренней поверхности ЖТ:

$$C_{\text{вн}} = 0{,}1\left(\frac{k_{\text{г}}}{x}\right) Re_x^{0{,}8}\left(\frac{x}{s}\right)^{0{,}36}(T_{\text{ст ад}} - T_{\text{ст вн}}).$$

Конвективный тепловой поток от наружной поверхности ЖТ:

$$C_{\text{нар}} = 0{,}02\frac{k_{\text{а}}}{D_{\text{нар}}^{0{,}2}} Re_s^{0{,}8}(T_{\text{ст нар}} - T_{\text{нар}}).$$

Вычисляется температура, соответствующая условию $C_{\text{вн}} = C_{\text{нар}} = K_{1-2}$.

Моделирование в ANSYS CFX

Для 3*D*-численного термогазодинамического моделирования в *CAD*-системе *NX* 8.0 построена твердотельная 3*D*-модель расчетной области ЖТ (область течения газа и твёрдой стенки), которая затем импортирована в *Ansys Workbench*. Далее на данных моделях построена конечно-объемная сетка (рис. 4). Сетка, построенная на модели области течения газа – тетраэдрическая со средним размером элемента 2 мм. Вблизи твердой стенки выполнено замельчение со средним размером элемента в зоне замельчения 0,5 мм. На границах модели, являющимися твёрдыми стенками, на которых происходит прилипание пограничного слоя, построены 10 слоев, состоящих из призматических элементов с общей максимальной толщиной 0,5 мм. Сетка, построенная на модели области течения газа, содержит порядка 3 млн. элементов. На модели твердой стенки построена структурированная сетка из параллелепипедов со средним размером элементов – 1 мм, общее количество элементов 120.

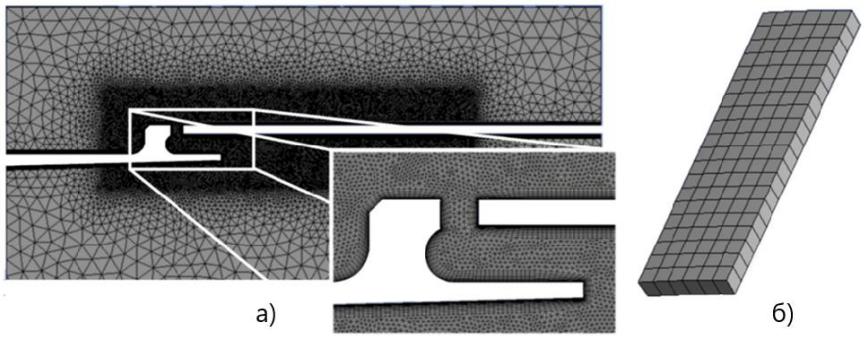


Рис. 4. Конечно-объемная модель исследуемого сектора:
а) газовый домен, б) твердотельный домен

После создания сетки в препроцессоре модуля *CFX* настроены граничные условия и законы расчета. Модель разделена на два домена – твердую стенку (на рис. 3. показана штриховкой) и область течения смеси охлаждающего воздуха и продуктов сгорания. Теплофизические свойства газов заданы в зависимости от рабочего тела (воздух и продукты сгорания) и температуры. Модель турбулентности в данном исследования – *k*-ε. На соответствующих граничных условиях заданы состав, скорость и температура на входе и давление на выходе. Затем проведены 13 расчетов в *CFX-Solver*. Критерий завершения расчета – сходимость основных уравнений 10^{-4} и дисбаланс порядка 0,1%.

Анализ результатов

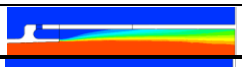
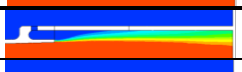
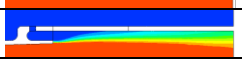
Сравнительный анализ результатов второй серии проведённых расчётов по инженерной методике и при помощи 3*D* численного моделирования приведён в таблице 2 и на рис. 5.

Таблица 2

Анализ результатов расчета эффективности охлаждения

$p_{нар}$, МПа	η (инженерный расчет)	η (*ANSYS CFX*)	Относительная погрешность, %	Поле температур вблизи стенки
1	2	3	4	5
1,7084	0,1445	0,1720	5,9892	
1,7086	0,1616	0,1772	8,8072	
1,7087	0,1925	0,1832	4,8057	
1,7089	0,2149	0,1965	8,5616	
1,7091	0,2304	0,2116	8,1470	
1,7099	0,3138	0,2952	5,9355	
1,7108	0,3952	0,3976	0,6037	
1,7117	0,4894	0,4998	2,0806	
1,7125	0,5832	0,6010	2,9740	
1,7134	0,6699	0,7024	4,6191	

Продолжение таблицы 2

1,7142	0,7439	0,8037	7,4405	
1,7151	0,8070	0,8665	6,8647	
1,7160	0,8648	0,9325	7,2575	

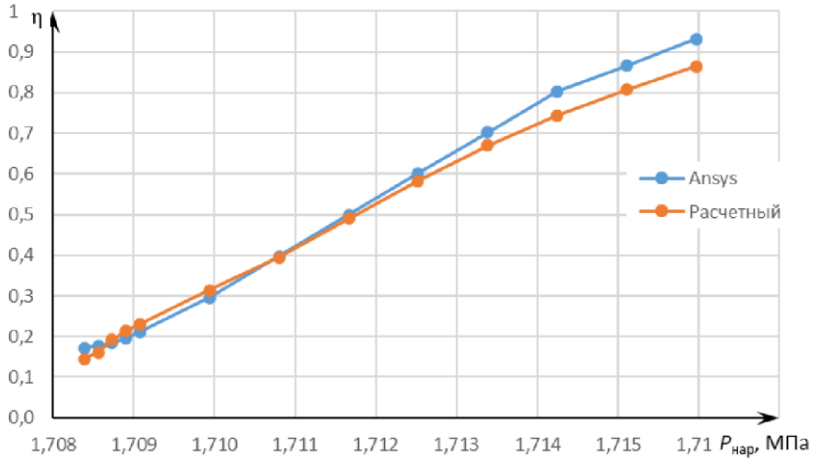


Рис. 5. График изменения эффективности охлаждения

Заключение

Проведено исследование теплового состояния секции ЖТ ЭУ на базе АЛ31СТ в различных эксплуатационных условиях, что привело к различной длине размытия плёнки охлаждающего воздуха. Не смотря на качественное совпадение кривых полученных при помощи 3D-численного термогазодинамического моделирования и инженерной методики расчёта, средняя относительная погрешность моделирования составила около 5%, а максимальная – порядка 7% (при большой длине охлаждающей пленки). В дальнейшем планируется дополнить исследуемую модель лучистым теплообменом от газа к стенкам ЖТ и от стенок ЖТ к корпусным элементам КС.

Библиографический список

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. канд. техн наук С.О. Апельбаума, А.А. Горбатко, А.Д. Рекина, В.И. Ягодкина, под редакцией д-ра техн. наук, проф. В.Е. Дорошенко. / – М.: Мир, 1986. – 566 с.

2. В.М. Кудоярова, А.Е. Кишалов. Решение прикладных задач теплообмена и гидрогазодинамики в пакете Ansys: учебное пособие. –Уфа: РИК УГАТУ, 2016. – 219 с.

3. Кишкин С.Т., Качанов Е.Б., Булыгин И.П. Под общей редакцией Шалина Р.Е. Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких материалов. – 1 изд. – М.: ВИАМ, 1989. – 566 с.

4. Вьюнов С.А., Гусев Ю.И., Карпов А.В., Ковалевская А.Е., Никитин Ю.М., Саркисов А.А., Споригина Н.М., Хачатуров К.Р., Хронин Д.В. Под общейредакцией Хронина Д.В. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей. Учебник для ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

© Чегодаева П.Д., 2024

СЕКЦИЯ 1.3. ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.1.016.7

А.А. АХМЕТШИН
artur.akhmetshin.2018@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ОСНОВНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Аннотация: на основе данных, взятых из литературы, проведен анализ влияния изменения геометрических характеристик основных камер сгорания на ее параметры.
Ключевые слова: авиационный двигатель; камера сгорания; геометрические характеристики.

Краткие теоретические сведения о камере сгорания

Камера сгорания газотурбинного двигателя является одним из основных его элементов, и в большой степени определяет в целом экологические характеристики и эффективность работы двигателя. Горение в камере газотурбинного двигателя обычно происходит в условиях трехмерного турбулентного неоднородного течения. Сложность и недостаточная изученность процессов в таких течениях не позволяют рассчитывать характеристики процесса горения и определять оптимальную конструкцию камеры сгорания на стадии ее проектирования. По данным многих исследователей, в сложных изделиях, таких, как газотурбинные двигатели (ГТД), основной объем времени в общем процессе его создания приходится на доводку.

Требования, предъявляемые к камерам сгорания:

1. Высокий коэффициент полноты сгорания топлива в заданном диапазоне режимов работы и параметров топливовоздушной смеси. Коэффициент полноты сгорания равен отношению количества теплоты, выделившееся в рабочем объеме камеры при горении топлива в единицу времени и затраченное на нагревание рабочего тела на полное количество теплоты, которое могло выделиться в единицу времени. В современных КС коэффициент во всем диапазоне рабочих нагрузок должен быть не менее 0,95; а на расчетном режиме не менее 0,98.

2. Малые гидравлические потери полного давления в камере (учитывается 3 вида потерь: 1 – на трения, 2 – турбулентные (удар в диффузоре,

смешение потоков, местные сопротивления, обусловленные местными циркуляционными течениями и т.д.) 3 – потоки давления в потоке при подводе теплоты) Потери давления в камере удобно оценивать коэффициентом сопротивления или коэффициентом восстановления полного давления

3. Высокая теплонапряженность рабочего объема. Высокая теплонапряженность рабочего объема обеспечивает малые размеры камеры сгорания Под теплонапряженностью камеры сгорания понимают количество тепла, выделяющееся единице объема (1 $м^3$) камеры в течение 1 часа.

4. Малая или заданная неравномерность поля температуры газа на выходе из камеры сгорания. Это требование связано с обеспечением долговечности лопаток и других деталей проточной части газовой турбины и определяется коэффициентом неравномерности поля температур газа

5. Быстрый и надежный пуск и устойчивая работа камеры сгорания ГТД. Камера сгорания ГТД должна отвечать этим требованиям при пониженных температуре и давлении на обедненной смеси с суммарным коэффициентом избытка воздуха α = 50-100(вместо обычного значения α = 3-5)

6. Большая долговечность конструкции, удобство и безопасность эксплуатации камеры. При длительном сроке службы очень важно, чтобы обслуживание, монтаж и разборка ее элементов были просты и не требовали больших затрат по времени.

7. Отсутствие нагара, дымления и токсичных веществ в продуктах сгорания. Нагар нарушает нормальный режим работы деталей камеры сгорания и проточной части турбины, регенератора. Дым и токсичные вещетсва загрязняют окружающую среду.

Влияние геометрии на характеристики камеры сгорания

Особенности, проявляющиеся в организации рабочего процесса с уменьшением размеров изделия, можно условно разделить на две группы:

1. Особенности, связанные с изменением параметров цикла и облика двигателя.

2. Особенности, связанные с изменением масштаба относительных величин, характеризующих конструкцию и процессы в камере.

Первая группа накладывает свой отпечаток на схему и конструкцию, что в конечном итоге реализуется в особенностях аэродинамической структуры течения и процесса подготовки ТВС в жаровой трубе.

Вторая влияет на характеристики КС по полноте сгорания топлива, стабилизации пламени и формированию поля температур газа на выходе.

Задание значения перепада давления (или числа Маха) при данных расходе, температуре и давлении определяет площадь отверстий жаровой трубы. Диапазон изменения площади отверстий невелик, так как излишне большие потери давления при малой площади отверстий неприемлемы. Большая камера сгорания, имеющая большую площадь отверстий, характеризуется низкими потерями давления, которые вызывают появление пиков температуры в турбине.

Число Маха. Для камер сгорания число Маха можно выразить следующим образом:

$$\frac{G_B\sqrt{T_K^*}}{\mu \cdot F_0 \cdot P_K} = c\sqrt{\sigma_Ж} = c_1 \cdot M$$

Где $\mu \cdot F_0$ – эффективная площадь отверстия, с и с1 – константы

Из уравнения числа Маха можно вывести другое соотношение:

$$\frac{\text{Длина камеры с одной форсункой}}{\text{Длина камеры с n форсунками}} = \frac{\sqrt{n}}{1} = \frac{\text{Обьем камеры с одной форсункой}}{\text{Обьем камеры с n форсунками}}$$

Из него следует, что можно существенно уменьшить длину и объем камеры путем применения множества небольших камер, которые ускорят перемешивание при сохранении скорости и уменьшении длины. Такой критерий широко используется в кольцевых камерах сгорания и в поршневых многоцилиндровых двигателях и является основным критерием при конструировании этих машин.

Число Дамкелера определяется как отношение времени смешения к времени реакции. В случае очень малой камеры сгорания или множества уменьшенных камер сгорания скорость перемешивания увеличивается и влияние скорости реакции, выражающееся через полноту сгорания и стабилизацию пламени, может стать более сильным.

Очевидно, что при уменьшении размеров камеры пропорционально увеличивается центробежная сила. Для сохранения геометрического подобия распределения жидкого топлива, необходимого при определяющей роли перемешивания, с уменьшением размера камеры нужно уменьшать размер капли. И в этом случае, пренебрегая изменением начальной скорости капли при впрыске ее в закрученный поток, можно показать, что при сохранении потерь давления на камере размер капли должен быть уменьшен в следующей пропорции:

$$\frac{D}{d} = \sqrt{\frac{R}{r}}$$

где R и r – внутренние радиусы воздушных завихрителей соответственно большой и малой камер; D и d – начальные размеры капель.

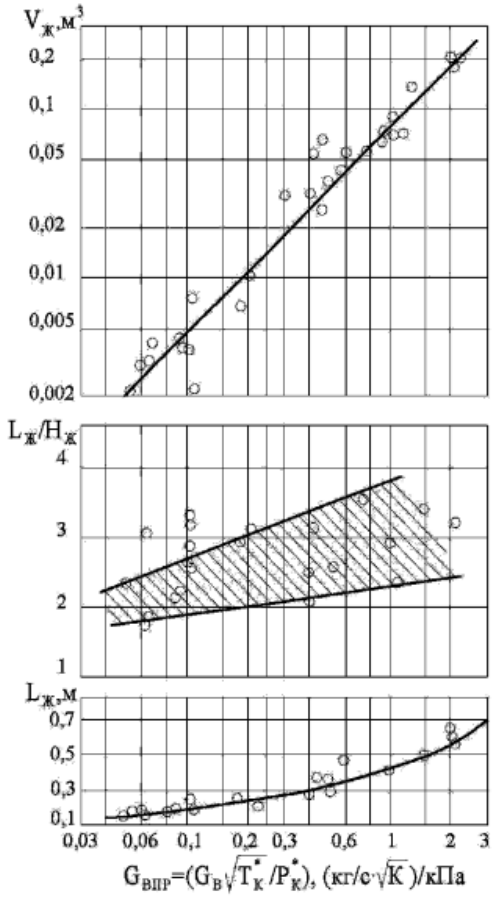


Рис. 1. Зависимость размеров камеры сгорания от приведенного расхода воздуха

В очень небольших камерах размер капли и скорость должны быть как можно меньшими.

Кроме объема жаровой трубы, который выбирается, исходя из требуемого уровня теплонапряженности либо коэффициента форсирования K_v, наиболее характерным изменениям могут быть подвержены струи подвода воздуха через стенки камеры сгорания и топливные форсунки. Относительно размеров струй воздуха, втекающих в жаровую трубу через боковые стенки, можно предположить, что предел их минимизации диктует глубина проникновения струи. Поскольку дальнобойность струи пропорциональна ее диаметру, а необходимая глубина проникновения и связанная с ней дальнобойность диктуется функциями соответствующей зоны, но все-таки определяется высотой сечения жаровой трубы – $h_ж$.

Следовательно, при уменьшении $h_ж$ пропорционально должны меняться размеры ввода воздуха.

Закономерность изменения количества отверстий в зависимости от размеров жаровой трубы. Так для цилиндрической трубы (индивидуальная или трубчатая КС):

$$\frac{n \cdot \pi \cdot \frac{d_0^2}{4}}{\pi \cdot h_ж \cdot L_ж} = const$$

С уменьшением размеров КС возрастает количество отверстий на единицу длины:

$$n = \frac{const}{h_ж}$$

Выводы:

Таким образом, уменьшение размеров КС требует постепенного перехода к перфорации стенок все более мелкими отверстиями с большим их числом n. Естественным пределом здесь будет функциональное ограничение d_0 , с одной стороны, из-за возможности их засорения при эксплуатации двигателей в условиях грунтовых аэродромов, а с другой – из-за возможного снижения глубины их проникновения непропорционально изменению высоты жаровой трубы.

Библиографический список

1. Дадж, А. Газотурбинные двигатели малой мощности. – М.: Иностранная литература, 1963. – 420 с.

2. Кулагин, В.В., Бочкарев, С.К., Горюнов, И.М. и др. под общ. ред. В.В. Кулагина. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД М.: Машиностроение, 2005, 464 с.

© Ахметшин А.А., 2024

УДК 621.548

А.С. БЕЛОНОЖКОВА
b.a.s.03629@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Р.Д. КАРИМОВ

Уфимский университет науки и технологий

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ: НОВЕЙШИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЧИСТОГО БУДУЩЕГО

Аннотация: ветроэнергетика играет все более важную роль в мировом производстве электроэнергии, что приводит к росту исследований и разработок в этой области. Данный сравнительный анализ рассматривает две статьи, посвященные различным аспектам ветроэнергетических систем.

Ключевые слова: ветроэнергетика; электроэнергия; исследование; системы; ветрогенератор; энергия ветра.

Несмотря на ряд проблем, таких как международные энергетические кризисы, загрязнение окружающей среды, глобальное потепление и т.д., мировое потребление электроэнергии продолжает расти. Вся энергия, производимая прямо или косвенно Солнцем, ветром, водой и биосистемами, классифицируется как возобновляемая энергия. В конкретном месте и в данный момент эти энергии безграничны. Эти энергии можно разделить на три основных типа возобновляемой энергии: механическую (волновая и ветровая), электромагнитную (фотоэлектрические модули) и тепловую (тепловые насосы) (геотермальная, солнечная тепловая и т.д.) [1]. В частности, энергия ветра может быть преобразована в механическую энергию для накачки воды или в электрическую энергию с использованием соответствующих электрических генераторов. Из-за домашних и промышленных целей, связанных с энергосистемой, этот второй тип преобразования вырос в популярности во всем мире. Энергия ветра как источник экологически чистой энергии предлагается в качестве одного из основных новых мировых источников энергии и приобрела большой размах во всем мире. В общем случае ветроэнергетическая установка представляет собой комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, который предназначен для преобразования энергии ветра в другие виды энергии [2]. За последние несколько десятилетий были разработаны ветряные турбины с различными генераторами для увеличения максимальной мощности, минимизации затрат и расширения использования ветряных турбин как на суше, так и в открытом море.

Ключевые технологии для устойчивого развития ветроэнергетики

Крупномасштабные турбины: увеличение размеров и мощности турбин повышает эффективность и снижает стоимость электроэнергии.

Модульные конструкции: модульная конструкция турбин упрощает транспортировку и сборку, что снижает воздействие на окружающую среду и сокращает сроки реализации проектов.

Оптимизированные аэродинамические профили: усовершенствованные аэродинамические профили улучшают коэффициент использования ветра, увеличивая выработку электроэнергии.

Интеллектуальные системы управления: интеллектуальные системы управления оптимизируют работу турбин, прогнозируют производство энергии и повышают надежность.

Гибридизация: интеграция ветроэнергетики с другими возобновляемыми источниками, такими как солнечная энергия, рассмотренная в статье [3], повышает гибкость и надежность энергосистемы. Это позволяет: повысить стабильность энергоснабжения, уменьшить зависимость от погодных условий, оптимизировать использование земельных и морских ресурсов.

Плавающие турбины: плавающие турбины позволяют использовать ветроэнергетический потенциал в глубоководных районах, расширяя возможности развития ветроэнергетики.

Разработка и строительство оффшорных ветряных ферм – одно из наиболее перспективных направлений, рассмотренных в статье [4]. В морских условиях ветер более стабилен и сильный, что позволяет увеличить производство электроэнергии. Кроме того, морские ветрогенераторы не занимают ценные земельные участки и меньше влияют на пейзаж.

Использование композитных материалов: композитные материалы снижают вес и повышают прочность турбин, увеличивая их срок службы и снижая эксплуатационные расходы. Применение интеллектуальных систем позволяет повысить коэффициент полезного действия ветрогенераторов, сократить время простоя и оптимизировать процесс обслуживания.

Преимущества устойчивого развития ветроэнергетики

Повышенная эффективность: новые технологии повышают эффективность ветровых турбин, что позволяет генерировать больше электроэнергии при том же ветровом потенциале.

Снижение стоимости электроэнергии: повышенная эффективность и оптимизированное проектирование снижают стоимость производства электроэнергии, что делает ветроэнергетику более конкурентоспособной.

Уменьшение воздействия на окружающую среду: новые технологии, такие как модульная конструкция и использование композитных материалов, снижают воздействие ветроэнергетики на окружающую среду.

Повышенная надежность: интеллектуальные системы управления и гибридизация повышают надежность ветроэнергетических установок, обеспечивая бесперебойную работу.

Ускорение перехода к чистой энергии: устойчивое развитие ветроэнергетики способствует переходу к более чистой и устойчивой энергетической системе, снижая зависимость от ископаемого топлива.

Новейшие разработки в ветроэнергетике способствуют ее постоянному развитию и расширению возможностей использования ветра в качестве источника чистой и возобновляемой энергии. От более крупных турбин до плавучих систем эти инновации повышают эффективность, снижают затраты и расширяют возможности ветроэнергетики. По мере того, как отрасль продолжает внедрять новые технологии, ветроэнергетика будет играть все более важную роль в переходе к устойчивому энергетическому будущему.

Библиографический список

1. Янсон Р.А. Ветроустановки: Учеб. пособие по курсам «Ветроэнергетика», «Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников энергии» / Под ред. М.И. Осипова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 36 с.
2. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. ИСЦ. М.: 2001. 62 с.
3. https://ieeexplore.ieee.org/document/10037683
4. https://ieeexplore.ieee.org/document/10090525

© Белоножкова А.С., 2024

УДК 504.054

Е.Э. БИКМУХАМЕТОВА
elizavetabikmuh@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент кафедры АТиТ Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ГТУ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Аннотация: в статье рассмотрены экологическое влияние ГТУ на окружающую среду. Влияние изменения топливного состава на выбросы. Использование водорода в качестве компонента топливной смеси.
Ключевые слова: газотурбинная установка; топливная смесь; углекислый газ; парниковый эффект; воздействие; выбросы; метан; водород.

Основной объём выбросов углекислого газа образуется в результате сгорания топлива в процессе выработки электроэнергии и тепла. В России энергетика выбрасывает примерно 2,18 млрд т углекислого газа, что составляет 82,3% от общего объема, выбрасываемых парниковых газов [1].

Поскольку правительство поощряют производство и использование водорода в энергетике с помощью газовых турбин может потенциально предоставить средства для снижения количества выбросов CO_2 при использовании хорошо зарекомендовавшей себя технологии.

Важнейшим направлением в развитии систем электроснабжения промышленных предприятий является использование теплоэлектростанций (ТЭС) с установленными газотурбинными установками (ГТУ). Использование ГТУ способствуют улучшению экологической ситуации, экономии топлива и при правильном использовании достаточно высокой эффективности использования топлива [2].

Углекислый газ является одним из основных газов, вызывающих парниковый эффект.

Парниковый эффект – это процесс повышения температуры поверхности Земли за счет того, что парниковые газы задерживают солнечное тепло, которое в противном случае ушло бы в космос.

Парниковые газы играют решающую роль в сохранении на Земле температуры, подходящей для жизни. Без естественного парникового эффекта средняя температура на планете составила бы около минус 20°C вместо нынешних около 15°C [3].

Ученые полагают, что энергетический баланс Земли с комфортной для многочисленных видов живых организмов температурой был нарушен с началом промышленной революции. Люди начали активно сжигать ископаемое топливо, что привело к масштабному выбросу углекислого газа и других парниковых газов в атмосферу. Десятилетиями уровень CO_2 в атмосфере растет, удерживает лишнее тепло у поверхности Земли, что вызывает общее повышение температуры.

К основным парниковым газам относятся:

- водяной пар;
- углекислый газ;
- метан;
- тропосферный озон [3].

Таблица 1

Данные по влиянию основных парниковых газов на парниковый эффект

Парниковый газ	Формула	Влияние, %
Водяной пар	H_2O	36-72
Углекислый газ	CO_2	9-26
Метан	CH_4	4-9
Озон	O_3	3-7

Можем сделать вывод, что водяной пар главным образом влияет на парниковый эффект, углекислый газ же занимает вторую позицию.

При использовании более современных наиболее экологически и экономически эффективных ГТУ можно сэкономить, по оценке Энергетического института Российской Академии наук, до 30% энергетических ресурсов, следовательно, общее количество выбросов загрязняющих веществ при этом сократится, примерно на 30%.

В АО «Башкирэнерго» в котельном цехе № 5 предприятия «Теплоэнергоцентраль» (г. Ишимбай) совместно с ГНПП «Мотор» (г. Уфа) сооружена опытно-экспериментальная газотурбинная энергетическая установка ГТЭ-10/95 номинальной электрической мощностью 10 МВт, действующая по схеме ГТУ-ТЭС. В качестве базового двигателя использован серийный авиационный турбореактивный двигатель типа Р-95Ш. В силовой (свободной) турбине применяют рабочие лопатки серийных авиационных ГТД. Для нагрева сетевой воды в котле-утилизаторе используется тепло отработанных газов. Котел-утилизатор представляет собой газоводяной подогреватель, выполненный с использованием спирально оребренных труб. Проектный КПД установки по выработке электроэнергии составляет 31,1%, с учетом утилизации тепла отходящих газов – 82% [2].

ГТЭ-10/95 имеет вдвое больший коэффициент полезного использования тепла, чем при выработке электроэнергии по конденсационному циклу. Это

определяет основное преимущество ГТЭ-10/95 в части воздействия выбросов на загрязнение атмосферы. Эмиссия загрязняющих веществ в атмосферу от газотурбинной установки зависит от вида топлива и конструкции камеры сгорания ГТУ. На первом этапе опытной эксплуатации газотурбинная установка работала на жидком топливе – керосине марки ТС-1. Конструкция камеры сгорания соответствовала конструкции камеры базового авиационного, двигателя с незначительными изменениями для улучшения полноты сгорания топлива при бедных составах смеси.

Сравнение этой ГТУ-ТЭС с существующими энергетическими ГТУ на жидком топливе показывает, что эмиссия оксидов азота на ГТЭ-10/95 несколько ниже уровня 190-210 мг/м^3, достигнутого на некоторых других ГТУ. В отличие от отечественных авиационных ГТД, используемых в настоящее время в схемах ГТУ, эмиссия оксидов азота двигателя Р-95Ш также ниже.

ГТУ-ТЭС при работе издает вредный для обслуживающего персонала и окружающего населения шум аэродинамического и механического происхождения (регламентируется ГОСТ 12.1.003-83), не только поражающий органы слуха, но оказывающий также и общее отрицательное, угнетающее влияние на организм человека, приводя к повышенной утомляемости, снижению реакций, ослаблению пульса, в итоге – к снижению производительности труда, росту брака и травматизма, к развитию различных хронических заболеваний, в том числе неврозов, гипертонии, язвенной болезни. Нормируются также уровни в близко расположенных от предприятий общественных и жилых зданиях (ГОСТ 12.1.036-81 или СН 3077-84). Шум и связанные с ним вибрации оказывают также разрушительное воздействие на сооружения и конструкции [2].

Шум аэродинамического происхождения возникает – вследствие стационарных и нестационарных процессов в воздухе и продуктах сгорания во всем аэродинамическом тракте от воздухозаборного устройства АГТД до выпуска отработавших в ГТУ-ТЭС продуктов в атмосферу.

Для снижения шумового воздействия в ГТЭ-10/95 предусмотрены меры по снижению шума от корпуса турбоблока, воздухозабора и выхлопа. Элементы шумоглушения представляют собой звукопоглощающие панели толщиной 0,2 м с наполнителем из супертонкого базальтового волокна или минераловатных плит (для корпуса турбоблока). Наружные стороны панелей защищены стальным листом, внутренние – перфорированным алюминиевым.

Результаты акустических измерений показали, что шум на рабочих местах (щит ГТЭ) и в различных точках промплощадки составлял 48–69 дБА и не превышал предельно допустимого уровня по ГОСТ 12.1.003-83, равного 80 дБА [2].

Наиболее важное значение имеет уровень шума от котельной с действующей ГТЭ-10/95 на границе жилой застройки в 600 м от объекта.

Нами проведен теоретический расчет ГТУ, работающих на газообразном топливе. Рассмотрим топливную смесь метан-водород.

Водород не имеет вредных выбросов при окислении (например, отсутствие CO, CO_2, SO_x сажи и т.д.), при этом, при включении водорода в топливную смесь в газотурбинных горелках возникают проблемы: увеличения образования NO_x из-за повышения температуры сгорания, необходимость модификации газотурбинных горелок, разработанных для гидроуглеродных топлив, чтобы обеспечить достаточно низкий уровень выбросов NO_x/CO при стабильном горении. Стали исследоваться эффекты добавления водорода в смеси на уровне компонентов.

Далее будут сравниваться количество выбросов в атмосферу парниковых газов при сжигании водорода и метана.

При соединении двух молекул водорода с одной молекулой кислорода возникают две молекулы воды. Реакция соединения водорода и кислорода сопровождается выделением энергии.

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{энергия}$$

При сжигании одного килограмма водорода (H_2) выделяется 120 МДж тепловой энергии и 9 кг водяного пара (H_2O).

При соединении одной молекулы метана с двумя молекулами кислорода возникают две молекулы воды и одна молекула углекислого газа. Реакция соединения метана и кислорода сопровождается выделением тепловой энергии.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2 + \text{тепловая энергия}$$

При сжигании одного килограмма метана (CH_4) выделяется 50 МДж тепловой энергии, а также 2,75 кг углекислого газа (CO_2) и 2,25 кг водяного пара (H_2O), то есть 5 кг парниковых газов [4].

Для получения 120 МДж тепловой энергии потребуется сжечь 2,4 кг метана. При этом в атмосферу попадет 6,6 кг углекислого газа и 5,4 кг водяного пара, то есть 12 кг парниковых газов [4].

Данные, приведенных выше расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Данные о выделении веществ при сжигании топлив

Масса сжигаемого топлива	Выделение тепловой энергии, МДж	Масса водяного пара, кг	Масса углекислого газа, кг	Суммарная масса парниковых газов, кг
1 кг водорода	120	9	-	9
2,4 кг метана	120	5,4	6,6	12

Можем сделать вывод, что при выработке одинакового количества тепловой энергии суммарные выбросы парниковых газов при сжигании метана выше, чем у водорода.

При этом выбросы водяного пара при сжигании метана примерно в 1,7 раз ниже, чем при сжигании водорода.

Из таблицы 1 видно, что влияние водяных паров на парниковый эффект более чем в два раза выше, чем влияние углекислого газа.

Если учитывать этот факт, то влияние сжигания 1 кг водорода и 2,4 кг метана на парниковый эффект соизмеримы. Если брать в расчет только выбросы вредных веществ, то в таком случае сжигание водорода является более экологичным по сравнению с метаном. Надо отметить что, для получения одинакового количества тепловой энергии нужна в 2,4 раза больше сжечь метана, по сравнению с водородом.

Если судить по зарубежным научным статьям можно сделать вывод, что на увеличение парникового эффекта оказывает влияние только углекислый газ.

Библиографический список

1. Завалеев И., Куприянова М. Выбросы парниковых газов и их взаимосвязь с выработкой энергии [Текст] / Завалеев И., Куприянова М. // СОК. – 2019. – № 9. – С. 82–89.

2. Кондратьев С.И., Кондратьева И.С. Экологическое воздействие энергетических газотурбинных установок на окружающую среду [Текст] / С.И. Кондратьев, И.С. Кондратьева // Проблемы энергетики. – 2003. – № 7-8. – С. 73–76.

3. Березовская Д. Парниковый эффект: причины, последствия, парниковые газы / Березовская Д. [Электронный ресурс] // Российская газета : [сайт]. – URL: https://rg.ru/2024/03/01/parnikovyj-effekt-kak-on-voznikaet-i-pochemu-opasen.html.

4. Рыбаков Б.А., Савитенко М.А. Применение водорода в энергетике: вопросы экологии / Рыбаков Б.А., Савитенко М.А. [Электронный ресурс] // АНО "Водородные технологические решения": [сайт]. – URL: https://ww-h2.com/services/application-of-hydrogen-in-the-energy-sector/.

© Бикмухаметова Е.Э., 2024

УДК 621.313

Е.С. БОДРОВ
bodzjendos@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Р.Д. КАРИМОВ

Уфимский университет науки и технологий

ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ: ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Аннотация: данная статья представляет собой обзор современных исследований в области электрогенераторов. В последние годы наблюдается значительный

прогресс в исследовании и разработке новых и усовершенствованных технологий. Представленный обзор дает всестороннее представление о современных исследованиях в области электрогенераторов, выделяя последние достижения и направления будущих разработок.
Ключевые слова: электрогенераторы; электроэнергия; технологии; мощность; ток;

Электрогенераторы являются основой современного производства энергии. Развитие новых технологий, таких как индукционные генераторы, линейные генераторы и системы управления, позволяет улучшить эффективность, надежность и адаптацию к различным условиям использования. В данной публикации проводится анализ трех статей, охватывающих ключевые аспекты разработки электрогенераторов.

В статье [4], которая посвящена асинхронным генераторам с самовозбуждением, которые активно применяются в системах на основе возобновляемых источников энергии, таких как ветроэлектростанции и малые ГЭС. Рассматриваются конструктивные особенности, схемы подключения и методы регулирования параметров.

Основные выводы:

- Простота конструкции и низкие эксплуатационные затраты делают такие генераторы популярными.
- Однако их использование ограничено нестабильностью выходного напряжения и зависимостью от параметров нагрузки.

В данной статье [5] представлена инновационная разработка и испытания линейного электрического генератора для использования с безпоршневым двигателем. Безпоршневые двигатели обладают рядом преимуществ, таких как высокая эффективность, низкие вибрации и компактный размер, что делает их привлекательными для различных применений, включая производство электроэнергии и транспортные средства.

Основные аспекты:

- Высокая компактность делает такие генераторы подходящими для автономных и мобильных приложений.
- Проведенные тесты показывают эффективность преобразования энергии, но подчеркиваются сложности с охлаждением и устойчивостью к вибрациям.

Статья [6] является обзором методов управления различными типами генераторов: синхронных, асинхронных и линейных. Электрические генераторы являются неотъемлемой частью современных энергетических систем, преобразуя механическую энергию в электрическую. Эффективное управление генераторами имеет важное значение для обеспечения надежной, эффективной и экономичной работы энергетических систем.

Основные результаты:

- Современные алгоритмы управления улучшают стабильность генераторов и их адаптацию к динамическим изменениям.
- Особое внимание уделено использованию цифровых систем управления.

Сравнительный анализ

Конструктивные особенности

- Индукционные генераторы отличаются простотой конструкции и невысокой стоимостью.
- Линейные генераторы предлагают инновационные решения для автономных систем, но требуют специальных материалов и сложного проектирования.
- Управляемые генераторы сосредоточены на программных и аппаратных улучшениях традиционных технологий.

Эффективность и надежность

- Линейные генераторы демонстрируют высокую эффективность в компактных системах, но испытывают проблемы с вибрацией и охлаждением.
- Индукционные генераторы эффективны при малых нагрузках, но их надежность падает при изменении параметров сети.
- Алгоритмы управления позволяют существенно повысить стабильность работы традиционных генераторов.

Применение

- Индукционные генераторы подходят для возобновляемых источников энергии (ветер, микро-ГЭС).
- Линейные генераторы перспективны в автономных системах и мобильных устройствах.
- Управляемые генераторы универсальны и находят применение в распределительных сетях и энергосистемах с высокой долей ВИЭ.

Анализ трех статей показывает, что каждый тип электрогенераторов имеет свои преимущества и ограничения. Индукционные генераторы просты и экономичны, линейные предлагают инновационные решения для автономных систем, а методы управления расширяют возможности традиционных технологий. Развитие возобновляемых источников энергии и растущий спрос на экологически чистые решения привели к появлению целого ряда инновационных технологий электрогенерации.

Современная энергетика выигрывает от использования гибридных подходов, которые объединяют достоинства различных типов генераторов. В будущем интеграция этих технологий с искусственным интеллектом и цифровыми системами управления может обеспечить более устойчивое и эффективное энергоснабжение.

Библиографический список

1. R.C. Bansal, T.S. Bhatti, and D.P. Kothari, “A bibliographical survey on induction generators for application of nonconventional energy systems,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 3, pp. 433–439, Sep. 2003.
2. A.H.M.B. Yatim and R. Nazir, “Development of a wind energy generator using a wound rotor self excited induction generator,” in Proc. Int. Symp. Advances in Alternative/Renewable Energy, Skudai, Malaysia, Jul. 22–24, 1997.
3. J. Debontridder, “The combination asynchronous generator-vertical axis wind turbine for small power applications,” in Proc. Int. Conf. Electrical Machines, Brussels, Belgium, 1978, G5/5.
4. https://ieeexplore.ieee.org/document/1432840.
5. https://ieeexplore.ieee.org/document/1105604.
6. https://ieeexplore.ieee.org/document/1040527.

© Бодров Е.С., 2024

УДК 621.548

Н.С. БОДРОВ
iqnikita007@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Р.Д. КАРИМОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАЗВИТИЕ И НОВШЕВСТВА ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация: ветроэнергетика представляет собой альтернативный источник энергии, в котором используется кинетическая энергия ветра для выработки электроэнергии. В последние десятилетия этот сектор демонстрирует устойчивый рост, став одним из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии.
Ключевые слова: ветроэнергетика; энергия; ветер; источник возобновляемой энергии.

Энергия ветра на протяжении продолжительного времени считается экологически чистым и неисчерпаемым источником энергии. Угроза нехватки невозобновляемых ресурсов, возникшая в 1973 году, а также увеличение зависимости от импортируемого топлива способствовали активизации исследований, направленных на развитие технологий, позволяющих эффективно преобразовывать ветер в используемую энергию [1].

Рассмотрим новшества технологий на примере научных зарубежных исследований.

В статье [2] исследуются последние достижения и будущие тенденции в области силовой электроники для ветроэнергетических систем:

1. Интеграция возобновляемых источников энергии: силовая электроника позволяет подключать возобновляемые источники энергии к сети, регулируя напряжение и частоту.

2. Многоуровневые преобразователи: многоуровневые преобразователи снижают гармонические искажения и улучшают качество электроэнергии.

3. Полупроводниковые устройства следующего поколения: материальные разработки, такие как нитрид галлия (GaN), обещают повышение эффективности и уменьшение потерь.

4. Модуляция и управление: расширенные методы модуляции и управления повышают производительность и надежность силовых электронных систем.

5. Цифровые системы: точные цифровые системы обеспечивают адаптивность и возможности удаленного мониторинга.

6. Интеллектуальные сети: силовая электроника облегчает интеграцию ветряных турбин в интеллектуальные сети, обеспечивая гибкость и балансировку спроса и предложения.

Силовая электроника продолжает играть решающую роль в развитии ветроэнергетических систем. Инновации в этой области приводят к повышению эффективности, надежности и снижению стоимости ветряной энергии, что делает ее более конкурентоспособной по сравнению с традиционными источниками энергии.

Статья [3] исследует устойчивость частоты энергосистемы с высоким уровнем ветроэнергетики во время штормов.

Ветровая энергия является прерывистым источником, и ее колебания во время штормов могут привести к отклонениям частоты. Для поддержания стабильности частоты требуются быстрые и действенные меры реагирования.

Авторы предлагают стратегию управления системой с использованием:

1. Централизованного управления нагрузкой для быстрой регулировки потребления электроэнергии

2. Распределенного управления ресурсами для оптимизации выходной мощности генераторов

3. Прогнозирования для предсказания изменений ветровой генерации

Результаты показывают, что предложенная стратегия значительно улучшает устойчивость частоты по сравнению с традиционными методами.

В заключение авторы подчеркивают важность интегрирования больших объемов ветровой энергии в энергосистему, одновременно обеспечивая надежность и устойчивость, особенно в экстремальных условиях, таких как штормы.

Представленные статьи исследуют влияние ветровой энергии на энергосистемы, уделяя особое внимание роли силовой электроники. Однако каждая из них фокусируется на разных аспектах.

Сегодня ветроэнергетика является крупномасштабным источником чистой энергии, используемым во многих странах мира. Она имеет свои

достоинства и недостатки. Несмотря на различные трудности, ветроэнергетика продолжает оставаться важным компонентом энергетики. Инвестиции в исследования и разработки, а также совершенствование технологий направлены на смягчение проблем и повышение потенциала ветроэнергетики.

Ее способность вырабатывать чистую и экономически эффективную электроэнергию, а также ее потенциал для снижения выбросов парниковых газов делает ее ключевым игроком в решении проблем изменения климата и построении устойчивого будущего.

Библиографический список

1. Д. де Рензо. Перевод с английского кандидатов техн. наук В.В. Зубарева и М.О. Франкфурта. Под редакцией доктора техн. наук Я.И. Шефтера. Ветроэнергетика / –Энергоатомиздат. Москва. 1982.
2. https://www.researchgate.net/publication/260619168_Future_on_Power_Electronics_for_Wind_Turbine_Systems
3. https://www.researchgate.net/publication/340227297_Frequency_Stability_of_Power_System_with_Large_Share_of_Wind_Power_Under_Storm_Conditions

© Бодров Н.С., 2024

УДК 621.311.24

Р.Д. КАРИМОВ, А.С. ГОРБУНОВ, И.Р. ГАЗЕТДИНОВ, Д.С. КАЛАШНИКОВ
ruslan-k88@yandex.ru

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРА В ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Аннотация: в данной работе проведен анализ многофазной конструкции генератора в ветроэнергетических установках.
Ключевые слова: многофазные генераторы, ветряная турбина.

Современные системы ветроэнергетики продолжают развиваться, и одной из ключевых задач является повышение эффективности и надежности ветрогенераторов. Одним из направлений решения этой проблемы является использование многофазных генераторов. Многофазные генераторы, в отличие от традиционных трехфазных, обеспечивают более стабильную работу, высокую отказоустойчивость и улучшенные характеристики, что делает их идеальными для применения в ветроэнергетике.

Многофазные генераторы отличаются от традиционных трехфазных систем наличием большего количества фаз, что обеспечивает несколько ключевых преимуществ в системах ветроэнергетики.

Преимущества многофазных генераторов в ветроэнергетике:

1. Повышенная надежность и отказоустойчивость. В случае выхода из строя одной из фаз многофазный генератор может продолжать работать на оставшихся фазах с меньшей мощностью. Это особенно важно в условиях, когда устранение неисправности может занять продолжительное время, как в случае с отдаленными ветроэнергетическими установками.

2. Уменьшение пульсаций электромагнитного момента. Многофазные генераторы обеспечивают более стабильную работу при преобразовании мощности, что снижает механические нагрузки на элементы трансмиссии и уменьшает вибрации, которые могут негативно сказаться на долговечности оборудования.

3. Снижение потерь. Многофазные системы обладают меньшими потерями на высоких частотах и меньшими требованиями к проводам, поскольку каждая фаза передает меньшую нагрузку по сравнению с трехфазной системой. Это делает систему более эффективной.

4. Снижение гармонических искажений. Увеличение числа фаз позволяет снизить гармонические искажения выходного напряжения и тока, что улучшает качество электроэнергии, производимой ветроустановкой, и снижает требования к фильтрации.

В настоящее время многофазные генераторы используются в различных типах ветровых турбин, включая маломощные установки для частного использования и крупные коммерческие ветроэнергетические комплексы. Одним из наиболее эффективных решений является применение шестифазных генераторов в прямоприводных ветроэнергетических установках. Такие установки не имеют механического трансмиссионного звена, что снижает количество движущихся частей и повышает надежность системы.

Многофазные генераторы обеспечивают эффективную работу в широком диапазоне скоростей ветра. Например, в установках с прямым приводом используется генератор, работающий при низких оборотах, что позволяет значительно уменьшить износ компонентов и повысить надежность работы за счет отказа от применения редуктора. Эти свойства, а также устойчивость к отказам делают такие установки идеальными для эксплуатации в удаленных районах, где обслуживание оборудования затруднено.

Можно выделить следующие области применения многофазных ветрогенераторов:

1. Малые ветроэнергетические установки. Генераторы с шестифазной системой находят широкое применение в малых ветроустановках, предназначенных для обеспечения электроэнергией сельских и удаленных потребителей, так как использование таких генераторов позволяет увеличить

срок службы установок и снизить потребность в техническом обслуживании, что важно для рассматриваемой области применения.

2. Крупные ветроэнергетические комплексы. В крупных установках с прямым приводом многофазные генераторы обеспечивают оптимальные характеристики при высоких нагрузках, уменьшая потери и повышая экономическую эффективность эксплуатации ветряных турбин.

3. Резервные системы питания. В случае применения многофазных ветрогенераторов в качестве резервных источников питания для крупных объектов, таких как больницы или промышленные предприятия, большое значение имеют высокая надежность и отказоустойчивость системы (при наличии резерва питания за счет аккумуляторов).

Несмотря на явные преимущества, использование многофазных генераторов в ветроэнергетике не лишено сложностей. Так, одной из главных проблем является высокая стоимость таких генераторов, поскольку увеличение числа фаз требует более сложной конструкции обмоток и усложнения их намотки. Однако с развитием технологий, связанных с наличием и разработкой современных намоточных станков, эти проблемы могут быть решены.

Для оценки перспектив применения многофазных ветрогенераторов были проанализированы научные публикации, в которых представлены результаты расчетов и оптимизации по различным критериям шестифазных синхронных генераторов с постоянными магнитами для прямоприводных ветрогенераторов [1]-[5]. Для одного из вариантов ветрогенератора, параметры которого приведены в табл. 1, результаты исследования показали, что при оптимизации по нескольким критериям (потери, стоимость, объем) КПД генератора составил 91,55%, а объем снизился более чем в 2 раза (табл. 2) [1]. Как видно, величина КПД ветрогенератора достаточно высокая, по сравнению с известными классическими синхронными генераторами аналогичной мощности, что подтверждает эффективность применения таких машин в ветроустановках.

Таблица 1

Основные параметры генератора.

Параметры конструкции	**Значение**
Номинальная мощность [Вт]	3500
Номинальное фазное напряжение [В]	250
Скорость вращения ротора [об/мин]	250
Номинальная частота [Гц]	12,5
Количество полюсов	6
Воздушный зазор [мм]	0,5
Плотность тока [А/мм^2]	5
Количество пазов на полюс и фазу	3

Окончание таблицы 1

Остаточная индукция магнитов [Тл]	1,23
Максимальная индукция в ярме статора и ротора [Тл]	1,5
Максимальная индукция в зубцах статора [Тл]	1,6

Таблица 2

Результаты оптимизации.

Параметр	Минимальные потери	Минимальная стоимость	Минималь-ный объем	Многокритериальная оптимизация
Потери [Вт]	243,10	333,39	329,50	322,98
Стоимость [$]	1075,19	499,66	503,83	507,78
Объем [см³]	17041,12	7697,47	7615,99	7666,46
КПД (%)	93,5	91,3	91,39	91,55

Таким образом, многофазные генераторы представляют собой перспективное направление в области ветроэнергетики. Их применение позволяет значительно повысить эффективность и надежность ветровых турбин, особенно в условиях переменных и низких скоростей ветра. Несмотря на высокую стоимость и технические сложности изготовления, использование многофазных генераторов в ветроэнергетических установках становится важным шагом к улучшению качества и доступности возобновляемой энергии в будущем.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Уфимского университета науки и технологий (ПРИОРИТЕТ-2030).

Библиографический список

1. Moazzen M.E., Gholamian S.A., Jafari-Nokandi M. Design of High-Efficiency and Low-Cost Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator for Direct-Drive Small-Scale Wind Power Application //Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2017. – Т. 13. – № 2. – С. 152–160.

2. Chinmaya K.A., Singh G.K. Performance evaluation of multiphase induction generator in stand-alone and grid-connected wind energy conversion system //IET Renewable Power Generation. – 2018. – Т. 12. – № 7. – С. 823–831.

3. Gang Y. et al. Multi-phase permanent magnet synchronous generator variable speed constant frequency offshore wind system based on modular multilevel

converter // 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). – IEEE, 2019. – С. 2127–2132.

4. Seangwong P. et al. A Novel Six-Phase V-Shaped Flux-Switching Permanent Magnet Generator for Wind Power Generation // Energies. – 2022. – Т.15. – № 24. – С. 9608.

5. Diana M., Lundmark S.T., Thiringer T. High voltage direct drive generators with multiphase single layer fractional slot concentrated windings //2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). – IEEE, 2020. – Т. 1. – С. 1903–1909

© Газетдинов И.Р., Каримов Р.Д., Горбунов А.С., 2024

УДК 623.462

А.Д. ГЕНЕРАЛОВ, П.А. НУГАЕВ
nerenegatik@gmail.com
Науч. руководитель – канд. тех. наук, зав. каф. АТиТ Н.С. Сенюшкин

Уфимский университет науки и технологий

РАКЕТА НА БАЗЕ РД-300 ДЛЯ СОРЕВНОВАНИЙ ВИШ25. ОПТИМИЗАЦИЯ И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация: в настоящей работе приведены принцип создания ракеты в рамках положения всероссийского чемпионата воздушно-инженерной школы на 2024 год, пути оптимизации и обоснование конструкции, а также теоретические расчеты и моделирование полёта.
Ключевые слова: ракетостроение; ракетные двигатели; аэродинамика; моделирование; OpenRocket; 3D-печать; оптимизация; система спасения.

В последнее время наблюдается рост интереса к любительскому ракетостроению в учебных учреждениях и центрах доп. образования. Создаются курсы для повышения квалификаций учителей, школы и образовательные учреждения внедряют проекты моделей ракет в учебные программы. Это позволяет ученикам на практике изучать физику, аэродинамику, инженерные принципы, что способствует более глубокому пониманию обучающимися научных концепций.

В работе рассмотрено создание модели ракеты с системой спасения в рамках соревнования «ВИШ25». Также проведена аналитическая оптимизация конструкции, обеспечивающая наиболее оптимальные показатели обтекаемости ракеты и высоты полёта.

Выбор двигателя для ракеты

В Таблице 1 были проведены сравнительные исследования модельных ракетных двигателей РД-300 и РД-100.

Таблица 1

Сравнение РД-300 и РД-100

Название	Масса, г	Суммарный импульс, Н*с	Длительность работы, с
РД-100	180	100-110	1.5
РД-300	440	280-300	2.5

Для достижения максимально возможной высоты полета ракеты был выбран двигатель РД-300. Несмотря на разницу двигателей в весе, РД-300, благодаря своему большему суммарному импульсу, позволит достичь большей высоты полёта, чем РД-100.

Моделирование ракеты

Дальнейшая конструкция ракеты будет спроектирована с учетом требований соревнований ВИШ25 на Лигу «Старший ГИРД».

Разработка конструкции ракеты начинается с моделирования[4][6] в специализированной программе OpenRocket. На этом этапе определяются размеры составляющих, формы обтекателя *(3)* и хвоста ракеты *(6)*, общая компоновка составляющих. При проектировании ракеты учитываются следующие факторы: стабильность полета, устойчивость к воздушным потокам, достижение максимально возможной высоты полёта.

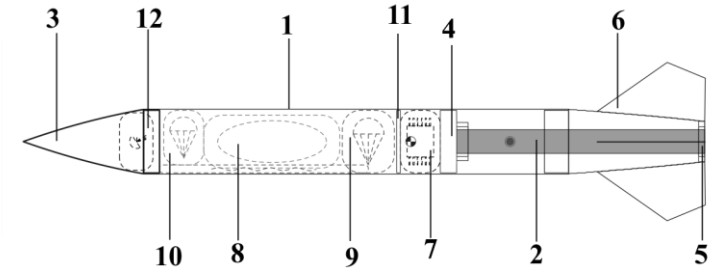


Рис. 1. Схема ракеты, спроектированной в OpenRocket, и её составляющие
1) корпус; *2)* двигатель; *3)* обтекатель; *4)* упор двигателя с хомутом;
5) центрирующее кольцо; *6)* стабилизатор ; *7)* электроника; *8)* полезная нагрузка; *9)* парашют для ракеты; *10)* парашют для полезной нагрузки;
11) платформа рогатки; *12)* разделительный механизм.

Для оптимизации конструкции ракеты необходимо учитывать несколько ключевых факторов:

– **масса**: использование легких компонентов, используя 3D-печать для изготовления деталей, минимизируя общую массу ракеты;

– **аэродинамика**: оптимизация формы обтекателя и стабилизаторов для снижения аэродинамического сопротивления и повышения стабильности полета;

–**прочность**: укрепление корпуса и других компонентов ракеты для обеспечения надежности и безопасности при запуске и полете.

Обтекатель *(3)* ракеты уменьшает аэродинамическое сопротивление и повышает стабильность полета. Он должен быть изготовлен из легкого и прочного материала и иметь обтекаемую форму для минимизации сопротивления воздуха. В программе OpenRocket была рассчитана сила аэродинамического сопротивления при максимальной скорости ракеты от формы обтекателя.

Таблица 2

Форма обтекателя	Сила аэродинамического сопротивления, Н
Коническая	41.3
Стреловидная	38.5
Эллипсоидная	39
Степенная	36.75
Параболическая	36.425

Сравнительные исследования силы аэродинамического сопротивления от формы обтекателя, приведенные в Таблице 2, показали, что параболическая форма обтекателя оказалась наиболее подходящей благодаря наименьшей силе аэродинамического сопротивления. Чем эта сила меньше – тем меньше сопротивление воздуха при полёте. В дальнейшем параболическая форма будет использоваться для обтекателя ракеты.

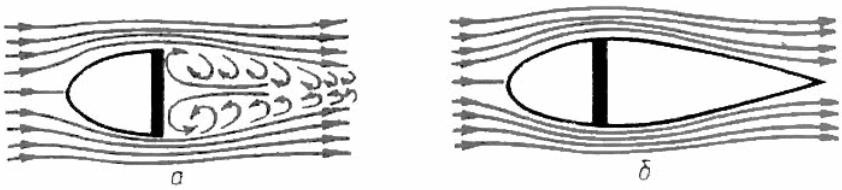


Рис. 2. Пример обтекаемости
а) без диаметрального перехода;
б) с диаметральным переходом

На Рисунке 2 показано, что с плавным сужением диаметра к концу снижается завихренность воздушных потоков. Соответственно, обтекаемость ракеты будет лучше, если к концу корпуса диаметр будет плавно уменьшаться. Поэтому хвост *(6)* ракеты был разработан как отдельный компонент для улучшенной аэродинамики[1]. Форма стабилизаторов была разработана – исходя от показателя стабильности ракеты методом подбора.



Рис. 3. система спасения «Циклон-2М»[8]
крепление обтекателя *(15)*, крепление парашюта *(17*) с амортизатором *(16)*
после срабатывания системы спасения

Были продуманы система спасения ракеты после отделения полезной нагрузки и система спасения самой полезной нагрузки. Система спасения ракеты состоит из парашютной системы *(9)(10)* и разделительного механизма *(12)*. При изготовлении системы спасения была взята часть системы Циклон 2-М[7], изображенная на Рисунке 3.

На краях корпуса закрепляется механизм катапульты из резинки, закрепленной чуть ниже выступа обтекателя, и переборки *(11)*, расположенной над бортовым компьютером. Разделительный механизм (12) состоит из сервопривода SG90 и металлических штифтов. Сервопривод проворачивает два штифта, когда получает сигнал от бортового компьютера *(7)* о достижении апогея, или через радиомодуль от оператора при нештатной ситуации. Штифты, закрепляющие обтекатель и корпус ракеты, втягиваются в корпус, после чего обтекатель *(3)* под давлением катапульты *(11)* выталкивается наружу, затем – вылетают система полезной нагрузки *(8)(10)* и парашют ракеты *(9)*.

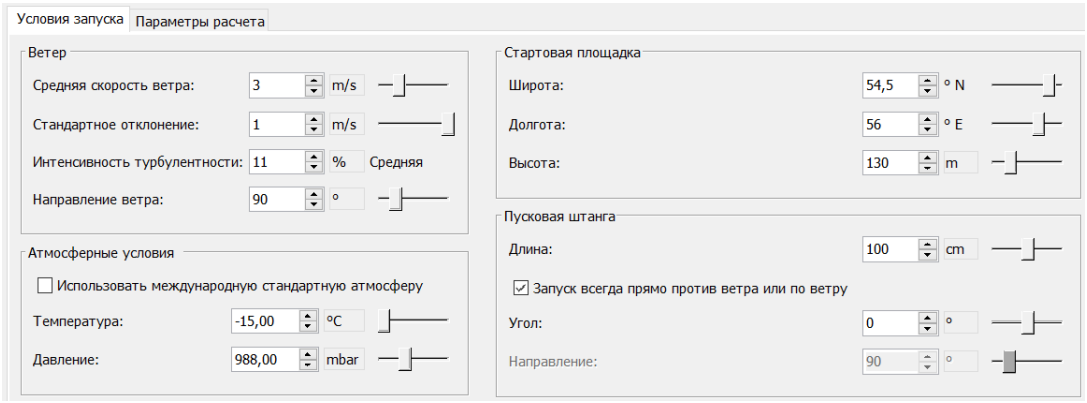


Рис. 4. задание условий моделирования запуска

Для полётных расчетов и моделирования поведения ракеты в воздухе были заданы условия, изображенные на Рисунке 4.

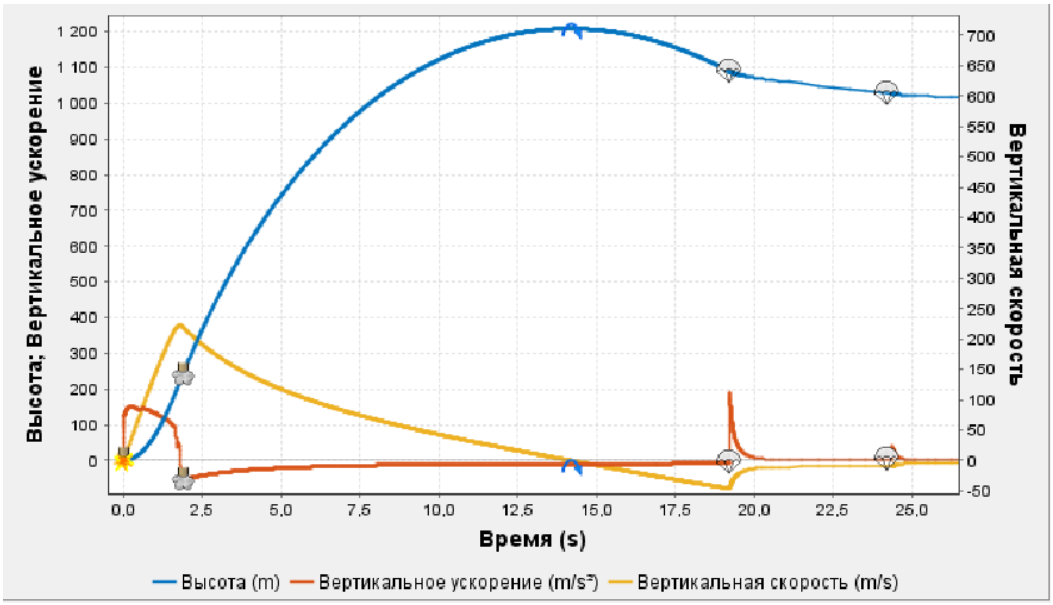


Рис. 5. Расчеты симуляции полёта

Расчеты и моделирование ракеты, приведенные на Рисунке 5, позволили определить теоретические значения скорости полета, ускорения, точки апогея. Результаты были использованы для корректировки форм обтекателя и стабилизатора, снижения общей массы.

Для изготовления корпуса *(1)* ракеты была выбрана пластиковая труба ввиду своей доступности, дешевизны, прочности и простоты в дальнейшей сборке.

В бортовом компьютере *(7)* были задействованы: плата Arduino Nano, датчик атм. давления и температуры BMP280, гироскоп MPU6050, модуль карт-ридера MICRO SD, радиомодуль NRF24L01

Компоновка:

В результате оптимизации ракета должна обладать достаточной стабильностью полета, минимально возможной массой и обеспечить максимальное достижение высоты. В разработке были задействованы компоненты, перечисленные в Таблице 3.

Таблица 3

Корпус	Полипропиленовая труба, D75x530 мм.
Двигатель	РД-300, 330x38 мм.
Обтекатель	Степенная форма (0,5), PLA-пластик, D75x140, выступ d70x20 мм.
Упор двигателя-хомут	PLA-пластик, d75x10 мм
Центрирующее кольцо	PLA-пластик, d50x5 мм
Хвост ракеты	PLA-пластик, хвост 200мм, D=75мм, d=50мм; произвольная форма стабилизаторов
Бортовой компьютер	PLA-пластик корпуса d78x60 мм.
Полезная нагрузка	Груз 220xd66 мм
Парашют для основы ракеты	Нейлоновый рип-стоп, D1000 мм, 8 строп по 800 мм.

Окончание таблицы 3

Парашют для полезной нагрузки	Нейлоновый рип-стоп, D500мм, 6 строп по 350 мм.
Механизм катапульты	Резинка эластичная тканевая; PLA-пластик платформы d=75мм
Разделительный механизм	Сервопривод SG90; PLA-пластик корпус d70x20 мм
Сухая масса (без двигателя):	850 гр.

После корректировок, детали были смоделированы в КОМПАС-3D для дальнейшей 3D-печати, что позволит в будущем создать детали с высокой точностью. Детали ракеты будут напечатаны на 3D-принтере из PLA-пластика.

Преимущества 3D-печати: Возможность создания сложных геометрических форм, высокая точность, возможность быстрой корректировки конструкции.

Недостатки 3D-печати: Ограничения по размеру и прочности деталей, скорость печати, стоимость оборудования и производства.

Заключение

Постепенная оптимизация конструкции ракеты позволила выявить следующие параметры:

Снижение массы: замена традиционных методов изготовления (например, склейка картона или бумаги) на 3D-печать с уменьшенным заполнением значительно снизила массу ракеты и увеличила точность задаваемых форм, что сказывается на снижении массы, а значит и повышенной дальности полёта.

Улучшенная аэродинамика: оптимизированная форма обтекателя (параболическая) снижает аэродинамическое сопротивление и повышает обтекаемость. Сужающийся хвост, по сравнению с вариантом отсутствием сужения, также дополнительно повышает обтекаемость. Это позволяет ракете развивать большую скорость и дольше удерживать её, что приводит к увеличению высоты и дальности полета.

Повышенная стабильность: Оптимизированные формы стабилизаторов, по сравнению с любой другой формой, дают гибкость в дальнейшем проектировании и позволяют точнее улучшить стабильность, уменьшая тем самым отклонения от заданной траектории.

После сборки ракеты были проведены испытания систем спасения. С высоты 6 этажей на парашютах поочерёдно сбрасывались ракета без полезной нагрузки и сама полезная нагрузка. Испытания показали хорошие результаты – грузы не повреждались при посадке. Испытание полётом пока не проводилось.

В качестве рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкции можно выделить следующие:

– проведение испытаний ракеты для определения оптимального баланса массы и тяги;

– разработка системы управления для более точного управления направлением полета ракеты;

– использование более легких и прочных материалов для изготовления деталей;

– применение дополнительных средств безопасности, таких как парашютная система резервного копирования.

Библиографический список

1. Зоншайн С.И. Аэродинамика и конструкция летательных аппаратов: Учебник для несамолетных специальностей авиационных вузов. – М.: Высш. шк., 1968. – 364 с.
2. Двигатель РД1-100. // REAL-ROCKETS.RU: интернет-маг. URL: https://real-rockets.ru/shop/motor-rd1-100-7m/
3. Двигатель РД1-300. // PODARINI.RU: интернет-маг. URL: https://podarini.ru/modelnye-raketnye-dvigateli/modelnyy-raketnyy-dvigatel-rd1-300-7/
4. Как построить модель ракеты // MASTERAERO.RU: электрон. журн. URL: https://masteraero.ru/modeli_raket-36.php
5. Курс повышения квалификации «Проектная деятельность для школьников на примере ракетостроения» // GOROCKET.RU: «Реактивное движение», 2022. URL: https://www.gorocket.ru/rocket_course
6. О моделировании ракет // DZEN.RU: контентная площадка URL: https://dzen.ru/a/YHWnhPRZ7y15bcf1
7. Система спасения ракеты «Циклон-2М» // KIA-SOFT.NAROD.RU : сайт, 2007–2024. URL: https://kia-soft.narod.ru/interests/rockets/cyclone2m/safety/safety.htm
8. Схема системы спасения ракеты «Циклон-2М» // KIA-SOFT.NAROD.RU: сайт, 2007–2024. URL: https://kia-soft.narod.ru/interests/rockets/cyclone2m/safety/photo/ssr.jpg

© Генералов А.Д., Нугаев П.А., 2024

УДК 629.7

Н.С. ДОСТОВАЛОВ
mari.luisrttt@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, зав. каф. Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация: в статье рассматриваются тенденции и проблемы развития беспилотных летательных аппаратов на основе статистических данных.

Ключевые слова: БПЛА; беспилотный летательный аппарат; перспективы; проблемы роста;

В наше время очень быстро развивается рынок БПЛА для различных целей использования. Необходимо развивать этот рынок, потому что это позволит автоматизировать множество процессов начиная от мониторинга заканчивая доставкой. Необходимо проанализировать рынок, чтобы понять: какие тенденции роста, какие могут быть проблемы.



Рис. 1. Статистика регистрации БПЛА

На рис.1 мы наблюдаем тенденцию роста регистрации БПЛА, это значит, что рынок БПЛА растет, однако есть проблемы, которые мешают росту рынка.

Для роста на мой взгляд необходимо решить острые проблемы: необходимы специалисты для разработки и эксплуатации, необходимо решить юридические проблемы.



Рис. 2. Статистика численность сотрудников занятых в сфере разработок и эксплатации БПЛА

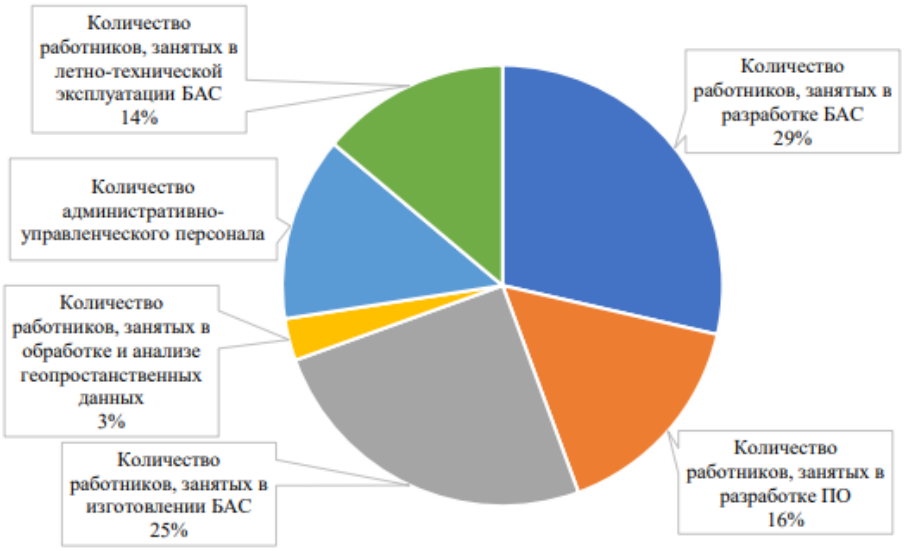


Рис. 3. Распределение сотрудников по направлениям на 2021 год [4]

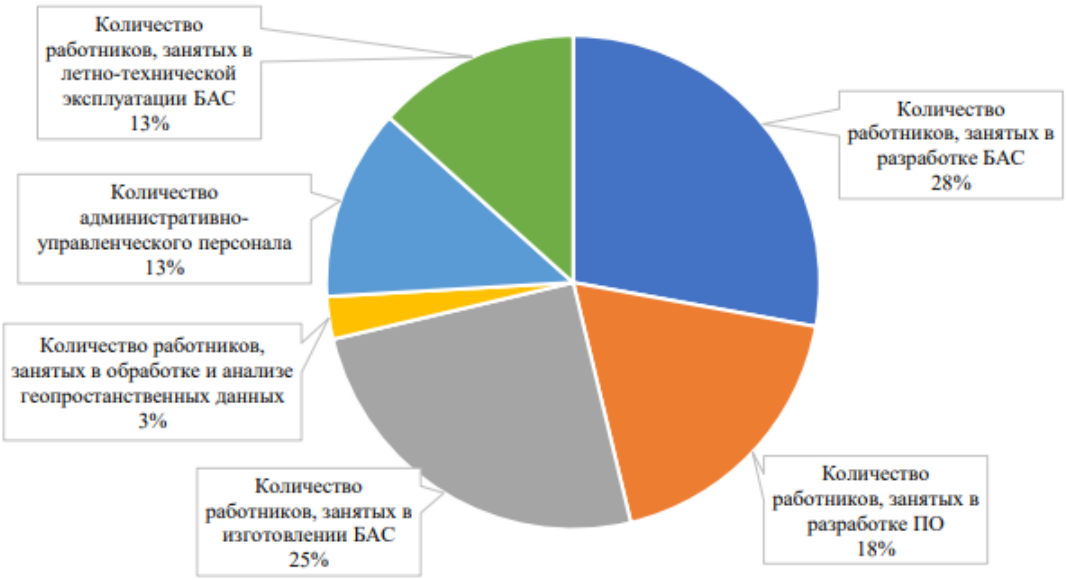


Рис. 4. Распределение сотрудников по направлениям на 2022 год [4]

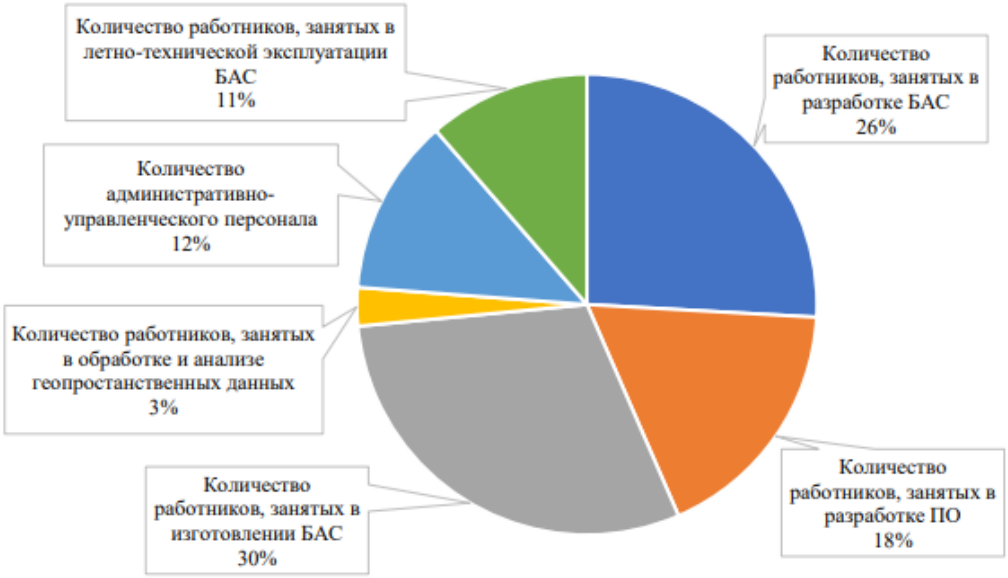


Рис. 5. Распределение сотрудников по направлениям на 2023 год [4]

Используя статистику распределения, делаем вывод, что недостаточно сотрудников в направлениях: занятых в обработке и анализе геопространственных данных, занятых в летно-технической эксплатации БПЛА, занятых в административно-управленческом персонале.

На момент 2024 года в некоторых регионах Российской Федерации в целях безопасности действуют запреты на полеты, для развития рынка БПЛА необходимо урегулировать движение БПЛА в регионах РФ. Это поспособствует тому, что БПЛА будет выполнять свои задачи даже на условях запрета. Запрет уже пагубно влияет на тех, кто пользуется услугами БПЛА. Также проблема запрета может повлиять на авиамоделистов, что также повлияет на потенциальных работников в сфере БПЛА.

Установлено что рынок БПЛА растет, однако есть и проблемы, которые решаются со временем и необходимо их решить, иначе эти проблемы могут пагубно повлиять на рынок.

Библиографический список

1. Федеральное агенство воздушного транспорта URL: https://vk.com/favt_drone
2. МИА «Россия сегодня» URL: https://ria.ru/20230116/bespilotniki-1845209490.html
3. Авиаремонтное предприятие «Мотор» URL: http://моторавиа.рф/news2/news2/read/url/id%3D8678
4. Ассоциация работодателей и предприятий индустрии беспилотных авиационных систем «Аэронекст» URL: https://aeronext.aero/press_room/analytics/292482

© Достовалов Н.С., 2024

УДК 621.548.

И.К. КИЛЬДИЯРОВ
asddsaychoba@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Р.Д. КАРИМОВ

Уфимский университет науки и технологий

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Аннотация: ветроэнергетика становится всё более важным элементом в мировом производстве электроэнергии, что вызывает необходимость в проведении исследований и разработок в этой области. В данном обзоре рассматриваются две статьи, посвящённые наземным и морским ветряным электростанциям.
Ключевые слова: ветроэнергетика; энергия морского ветра; электроэнергия; ветрогенератор; энергия ветра.

Китай, Соединённые Штаты Америки и государства Европейского союза занимают значительную часть рынка ветроэнергетики. На рисунке 1 показана общая мощность ветроэнергетики с 2001 по 2020 год. График демонстрирует рост мощности с каждым годом. [1]

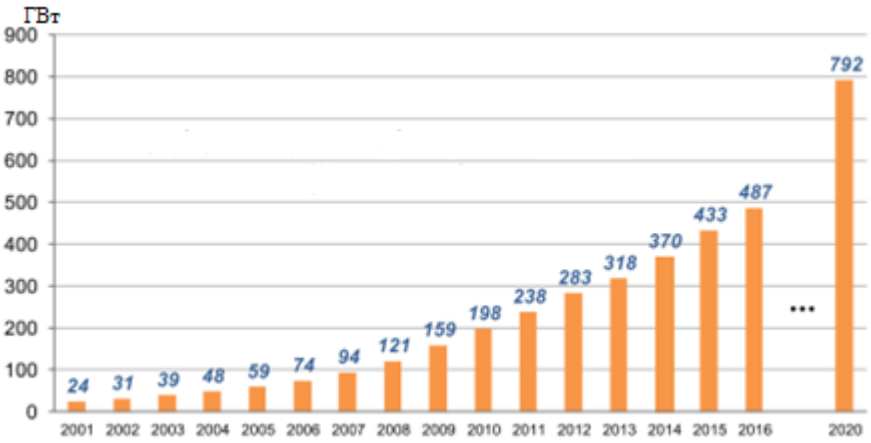


Рис. 1. Общая мировая мощность ветроэнергетики с 2001 по 2020 год.

Основные компоненты, которые нужны для того, чтобы преобразовывать энергию ветра в электричество в обычной системе ветроэнергетики, это турбина с лопастями, редуктор, генератор, силовой преобразователь и трансформатор.

С ростом мощности ветровых турбин и электростанций появляется потребность в преобразовании энергии на более высоких уровнях напряжения – от 1 до 10 киловольт. Это требует не только улучшения эффективности преобразования, но и повышения надёжности всей системы.

Асинхронный генератор с двойным питанием. В этом устройстве обмотки статора напрямую соединены с электрической сетью через трансформатор. А обмотки ротора подключены к электросети через силовой электронный преобразователь.

Благодаря такой конструкции можно гибко регулировать частоту и ток в роторе, что позволяет изменять скорость вращения лопастей в нужных пределах для достижения максимальной выработки энергии.

Главное преимущество этой конструкции – её надёжность и доступность. Она способна генерировать электроэнергию в широком диапазоне скоростей ветра [1]

Синхронный генератор с полномасштабным преобразователем мощности.

В отличие от предыдущего генератора, этот не нуждается в редукторе, что позволяет снизить затраты на строительство и техническое обслуживание ветроэнергетической установки.

Однако у этого генератора есть и недостатки. Один из них – более высокие потери мощности на этапе преобразователя. Из-за этого концепция не всегда применяется в наземной ветроэнергетике. [1]

Кроме того, существует множество возможностей для развития технологий силовой электроники, связанных с необходимостью снижения стоимости энергии и повышения её эффективности.

Наиболее перспективными регионами для производства энергии из ветра являются прибрежные территории.

В морской среде скорость ветра выше, чем на суше, поэтому морские ветряные электростанции способны генерировать больше электроэнергии на единицу установленной мощности.

Мощность морских ветряных электростанций может достигать 630 МВт. Например, ветряная электростанция Анхольт в Дании, которая была введена в эксплуатацию в 2013 году, имеет номинальную мощность 400 МВт и состоит из 111 ветряных турбин Siemens мощностью 3,6 МВт.

Ветряные электростанции, расположенные на некотором расстоянии от берега, могут использовать устройства высоковольтных линий электропередачи или ВЛЭ постоянного тока для сбора энергии от большого количества не синхронизированных генераторов и передачи её на берег по подводному кабелю.

ВЛЭ постоянного тока позволяет передавать электроэнергию с максимальной эффективностью и минимальными потерями. Преимущества размещения ветряных электростанций в морской акватории [2]:

- В море преобладают более сильные и стабильные ветры, что повышает производительность установок. Социальные. Повышение качества жизнеобеспечения в изолированных районах.
- Экологические. Улучшение качества жизни в отдалённых районах. Отсутствуют проблемы, связанные с шумом и визуальным воздействием ветряных установок, чистота окружающей среды.

Однако есть и недостатки:

- Более высокие затраты на монтаж и эксплуатацию по сравнению с объектами, расположенными на суше.
- Трудности с глубиной. В большинстве стран мира дно имеет крутые склоны, что делает невозможным установку обычных морских ветряных турбин на бетонном фундаменте даже вблизи берега. За последние несколько десятилетий мощность и эффективность ветряных турбин значительно выросли, что сделало энергию ветра важным и перспективным источником энергии для энергетических систем.

Современные технологии силовой электроники, включая элементы управления, значительно улучшили работу ветряных турбин. Это позволило повысить эффективность преобразования энергии и снизить её стоимость.

Однако, несмотря на достигнутые результаты, существует множество возможностей для дальнейшего развития технологий силовой электроники. Это включает в себя разработку новых топологий и силовых устройств, повышение надёжности, внедрение накопителей энергии и дополнительных возможностей управления энергетическими системами.

Библиографический список

1. Wind Energy Systems / F. Blaabjerg and Ke Ma. – 2017. – С. 2116–2131. DOI:10.1109/JPROC.2017.2695485
2. Елистратов. В.В. Использование энергии ветра на северо-западе России [Электронный ресурс] / В.В. Елистратов – Режим доступа: https://ecoteco.ru/id805/

© Кильдияров И.К., 2024

УДК 621.314.6

А.Ю. КЛИМЕНКО, А.С. ГОРБУНОВ, Р.Д. КАРИМОВ
carlos9631432348@gmail.com

Уфимский университет науки и технологий

ВЫБОР РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация: в настоящей работе рассматриваются варианты регулирования пароводяных трактов в теплоэнергетике и системы регулирования в ветроэнергетических установках. Проведен анализ особенностей работы различных типов приводов в условиях переменной нагрузки, характерной для ветроэнергетических установок, включая системы регулирования угла атаки лопастей и ориентации гондолы. Сравниваются способы регулирования частоты вращения агрегатов для выявления наиболее перспективного с учетом специфики применения как в традиционной энергетике, так и в ветроэнергетических установках. Предлагается использование современного вентильно-индукторного двигателя для обоих типов энергоустановок с обоснованием его преимуществ.
Ключевые слова: ветроэнергетика, теплоэнергетика, регулируемый привод, дутьевой вентилятор, насос, регулируемый электродвигатель.

Область энергетики, включающая в себя как теплоэнергетику, так и активно развивающуюся в настоящее время электроэнергетику (далее будем рассматривать ветроэнергетику как часть электроэнергетики) требует постоянного улучшения работы энергоустановок и электростанций и возможности их максимальной автоматизации, что обуславливает необходимость повышения качества имеющегося оборудования. Эта необходимость становится особенно актуальной в свете растущих требований к энергоэффективности и экологичности производства энергии.

В статье будут рассмотрены варианты управления паровоздушных трактов в теплоэнергетике и систем регулирования в ветроэнергетике. Будут сравнены варианты механического и электрического управления частотой

вращения приводов для выявления наиболее экономичных решений, применимых в обеих областях энергетики. Особое внимание будет уделено анализу возможностей современных типов электроприводов удовлетворять специфическим требованиям как тепловых станций, так и ветроэнергетических установок.

Ускоренное развитие электротехники в последние полвека открывают возможности применения управляемых электродвигателей в приводах установок. В теплоэнергетике это касается прежде всего тягодутьевых машин и насосов, а в ветроэнергетике - систем регулирования угла атаки лопастей (pitch control) и ориентации гондолы (yaw system). Несмотря на различное назначение, эти системы объединяет необходимость точного регулирования в условиях переменных нагрузок.

На данный момент в теплоэнергетике применяют как нерегулируемые, так и регулируемые приводы тягодутьевых машин, среди которых: стандартный асинхронный двигатель, двухскоростной асинхронный двигатель, асинхронный двигатель с частотным преобразователем (АД с ЧП), а также регулирование потока с помощью гидротрансформатора, дросселей, увеличения количества работающих агрегатов при постоянном числе тягодутьевых машин.

Самым простым решением является применение простого или двухскоростного асинхронного двигателя, однако это далеко не наиболее оптимальный вариант ввиду ухудшения работы узлов станции, значительных затрат электроэнергии на собственные нужды [1], ограниченных возможностей ступенчатого регулирования. Применение заслонок и дросселей тоже является простым решением регулирования трактов, однако они понижают надежность узлов, значительно усложняют эксплуатацию, обслуживание и ремонт узла. Дроссельное регулирование применяют в основном для маломощных машин при малой величине регулирования [2]. Кроме того, при таком регулировании работа электродвигателя насоса недостаточно энергоэффективная.

Для регулирования пароводяного тракта также используется гидромуфта, график КПД которой представлен на рис. 1. Гидромуфта способна обеспечить плавное изменение частоты вращения рабочих машин, что является более эффективным способом регулировки.

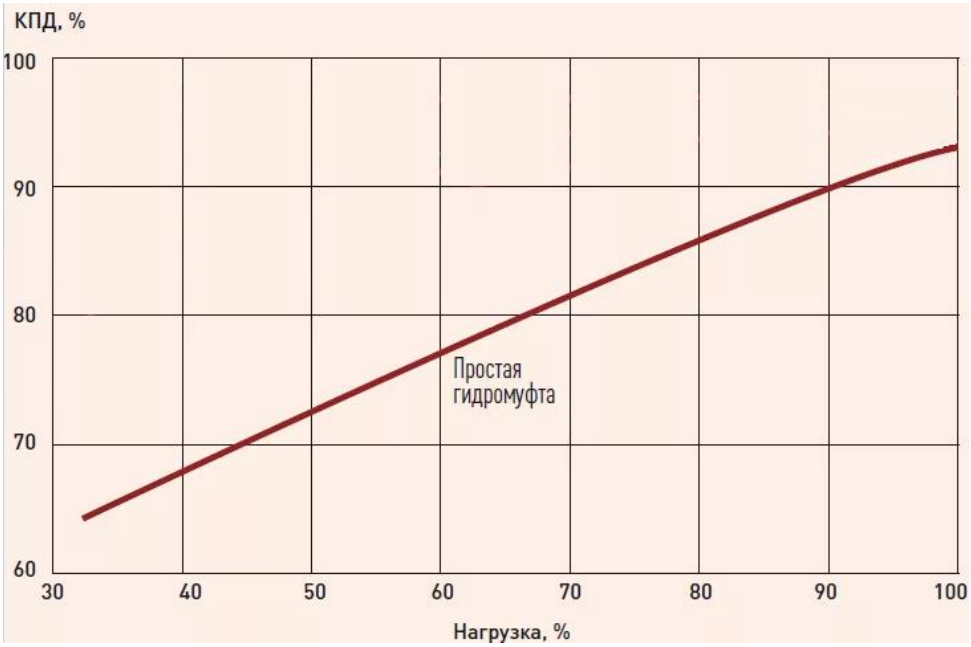


Рис. 1. Зависимость КПД гидромуфты от нагрузки

Однако, как видно из рис. 1 применение гидромуфт целесообразно только при больших мощностях рабочих машин, высоких частотах вращения и неглубоком регулировании производительности, т.к. стоимость гидромуфт высока, а их КПД уменьшается с уменьшением частоты вращения рабочей машины [3].

В ветроэнергетических установках (ВЭУ) качество работы приводных систем оказывает существенное влияние на эффективность выработки энергии, коэффициент мощности ВЭУ. Так, точность выставления угла атаки лопастей и точность ориентации гондолы оказывает влияние на уровень выходной мощности, производительность, в том числе при переменных скоростях ветра.

В ВЭУ к системам регулирования угла атаки лопастей и угла ориентации гондолы также предъявляются высокие требования. Так, требования к системе ориентации лопастей:

- высокая точность поворота лопасти.
- малое время поворота лопасти на полный рабочий диапазон.
- синхронность работы приводов всех лопастей.

К требованиям к работе систем ориентации гондолы можно отнести:

- необходимость высокого пускового и номинального момента двигателя при работе с малой частотой вращения;
- высокая точность ориентирования гондолы;
- необходимость плавного перемещения гондолы или регулирования скорости ее перемещения для точного позиционирования ввиду большой массы гондолы, обладающей значительным моментом инерции.

С развитием технологий для рассматриваемых областей энергетики в последнее время стало возможным применение регулируемых

электродвигателей. Наиболее распространенным вариантом является АД с ЧП, характеристика КПД которого показана на рис. 2. Его отличиями от простого асинхронного двигателя являются наличие полупроводникового частотного преобразователя, усиленная изоляция обмоток, изолированные подшипники, независимое охлаждение (при необходимости). В [4] описываются следующие преимущества АД с ЧП:

– высокая эффективность, экономичность и большой диапазон регулирования;

– легкость эксплуатации и обслуживания;

– исключение гидродинамических ударов в тепломеханической схеме энергоблоков в пусковых режимах и при других переходных процессах;

– экономичное прохождение энергоблоками режима «скользящих» параметров пара, обеспечение маневренности и высокой эффективности расхода топлива в этом режиме;

– обеспечение режима «мягкого» пуска с токами, близкими к номинальному, автозапуск (рестарт) электроприводов при глубоких колебаниях или кратковременных падениях напряжения в системе электроснабжения собственных нужд и т.д.

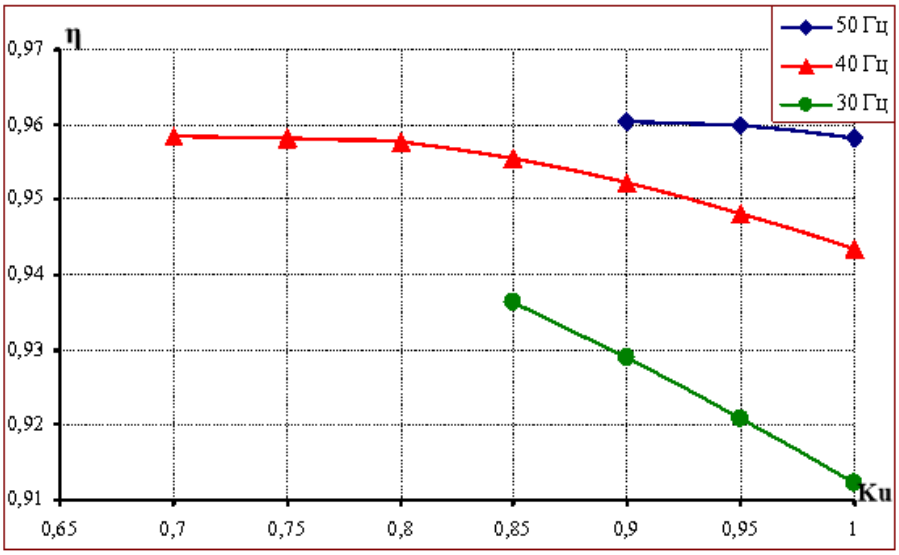


Рис. 2. Изменение КПД при изменении частоты и напряжения

Из зависимости КПД АД с ЧП видно, что при регулировке частоты и изменении напряжения двигателя, его КПД остается высоким, что является сильным преимуществом перед гидромуфтой, а значит позволит значительно снизить затраты электроэнергии станции на собственные нужды.

Для применения в качестве привода элементов ВЭУ можно выделить следующие преимущества АД с ЧП:

- возможность обеспечения высокой точности регулирования лопасти и гондолы;
- хорошие динамические характеристики, возможность регулирования скорости перемещения гондолы;

- широкий диапазон рабочих скоростей;
- обеспечение высоких пусковых и номинальных вращающих моментов двигателей.

Еще одним из вариантов привода объектов ВЭУ и теплоэнергетики является вентильно-индукторный двигатель (ВИД) [5], представляющий собой электрическую машину, функционально объединенную с системой автоматического управления (рис. 3), позволяющей осуществлять оптимальное управление двигателем с максимальными показателями качества преобразования энергии.

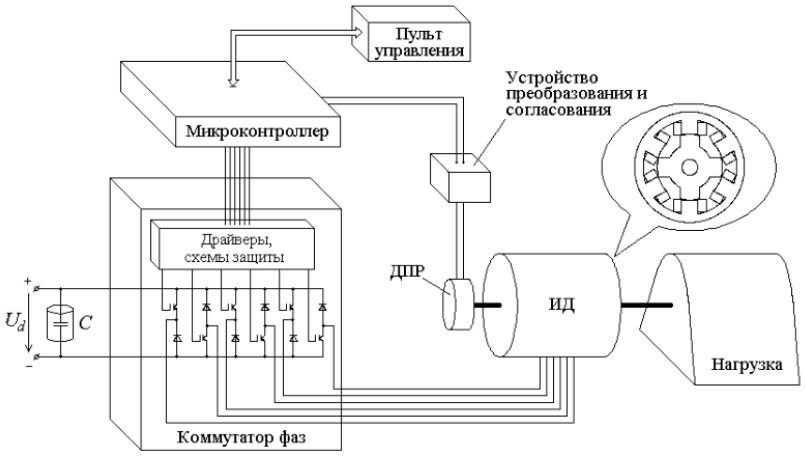


Рис. 3. Функциональная схема ВИД (ДПР – датчик положения ротора, ИД – индукторный двигатель)

К достоинствам ВИД можно отнести:

– высокая надежность и простота конструкции;

– малый момент инерции;

– упрощенный обмоточный процесс и отсутствие обмоток или магнитов на роторе, что делает данную машину несколько дешевле аналогов;

– возможность работы в тяжелых и изменяющихся условиях окружающей среды в диапазоне нагрузок от холостого хода до короткого замыкания.

Среди недостатков ВИД можно отметить пульсацию момента ввиду конструкции ротора [5].

Для применения в качестве привода элементов ВЭУ можно выделить следующие преимущества ВИД:

- простота конструкции, что обуславливает повышенную надежность, особенно в сложных погодных условиях работы ВЭУ;
- высокий момент при низких скоростях, что особенно актуально для систем ориентации гондолы;
- высокие динамические показатели, малый момент инерции, что важно для систем ориентации;
- хорошая защищенность от внешних воздействий, отсутствие скользящих контактов и щеток;

- невысокая стоимость обслуживания, что важно для автономных объектов.

Таким образом, в ветроэнергетических установках для систем регулирования угла атаки лопастей и для систем ориентации гондолы оптимальным является применение ВИД ввиду их высокой надежности, точности позиционирования, высокому моменту при низкой частоте вращения; а также АД с ЧП благодаря их способности обеспечивать плавное регулирование частоты вращения при высоких моментах.

Из сравнения рассмотренных вариантов регулирования пароводяного тракта для теплоэнергетики можно отметить, что наиболее перспективными вариантами привода тягодутьевых агрегатов и насосов также являются регулируемые электродвигатели, в частности АД с ЧП, который выигрывает у гидромуфты значительно большим КПД при работе на более низких оборотах. В качестве альтернативы АД с ЧП могут быть применены ВИД ввиду их отмеченных преимуществ. Применение управляемых электродвигателей может снизить затраты на собственные нужды электростанции [6], повысить надежность и ремонтопригодность узлов. Также стоит отметить, что применение регулируемых электродвигателей упрощает возможность автоматизации станции, что может привести к повышению качества работы станций и увеличить экономию удельного расхода топлива [4].

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Уфимского университета науки и технологий (ПРИОРИТЕТ-2030).

Библиографический список

1. Ярыгина Е.А. Разработка методики краткосрочного прогнозирования электропотребления системы собственных нужд ТЭЦ: специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: Диссертация на соискание кандидата технических наук / Ярыгина Е.А.; Самарский государственный технический университет. Самара, 2021. – 125 с.

2. Слесаренко В.В. Насосы и тягодутьевые машины тепловых электростанций: Учебное пособие. Владивосток: Издательство ДВГТУ, 2002. – 84 с.

3. Собственные нужды тепловых, атомных и гидравлических станций и подстанций: учебное пособие / Изд. 2-е, испр. и доп. Благовещенск, Изд-во АмГУ, 2013. – 315 с.

4. Способы экономичного регулирования частоты вращения механизмов собственных нужд. URL: https://megalektsii.ru/s456t12.html (дата обращения: 21.11.2024).

5. Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособие по курсу "Специальная электромеханика"

для студентов, обучающихся по направлению "Электротехника, электромеханика и электротехнологии". М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 55 с.

6. Красногвардейский машиностроительный завод. URL: https://kmz-ural.com/ (дата обращения 21.11.2024).

© Клименко А.Ю., Горбунов А.С., Каримов Р.Д., 2024

УДК 621.838.3

Р.Д. КАРИМОВ, Г.О. МУСТАФИН

germancooi@mail.ru

Уфимский университет науки и технологий

МАГНИТНЫЕ МУФТЫ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ МАГНИТНЫХ МУФТ

Аннотация: в статье рассмотрены некоторые магнитные муфты, применяемые в настоящее время. Приведены простейшие конструктивные схемы магнитных муфт.
Ключевые слова: магнитная муфта, аксиальная магнитная муфта, радиальная магнитная муфта, математическая модель, аналитическое моделирование, магнитные системы

Магнитная муфта – современное переосмысление распространённых механических муфт. Передача вращающего момента происходит посредством магнитных пар без непосредственного контакта сопрягаемых валов. Такой подход к проектированию позволил добиться не только качественного скачка в надежности соединения, но и – решения некоторых актуальных проблем в машино- и приборостроении: удалось разработать экстренно размыкаемые муфты, предотвратить разрушение и деформацию валов при аварийном останове машины и сохранить в чистом виде контактирующую с валами среду.

Магнитные муфты допускают выполнение множеством различных вариантов, наибольшее распространение из которых получили муфты с расположением магнитов на плоскости, перпендикулярной оси вала (аксиальные магнитные муфты) и – муфты с магнитной системой, расположенной по диаметру, соосно с валом в специально спроектированных частях механизма (радиальные магнитные муфты).

Направление развито недостаточно широко, чтобы утверждать безусловное преимущество одного исполнения над другим и на сегодняшний день тип исполнения муфты напрямую зависит от условий производства и требований, обусловленных предполагаемым местом установки.

Однако была выработана некоторая закономерность: аксиальные муфты применяются в соединениях на “поверхности”, для увеличения простоты и

технологичности ремонта, а различные погружные соединения или насосы – муфтами радиального исполнения. Конструкции таких муфт соответственно представлены на рисунках 1 и 2.

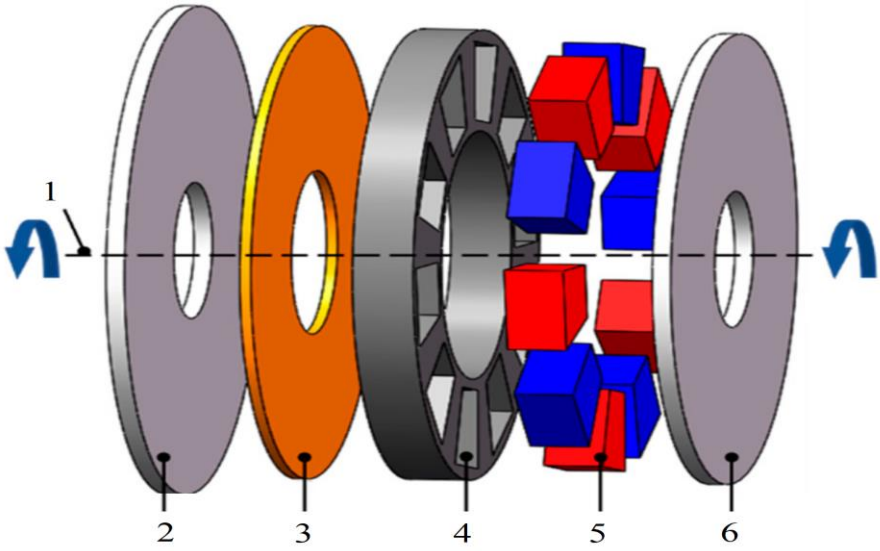


Рис. 1. Аксиальная магнитная муфта [1]

Где: 1 – ось вала; 2 – сегмент корпуса вала; 3 – упор магнитной системы; 4 – кожух магнитной системы; 5 – магнитная система.

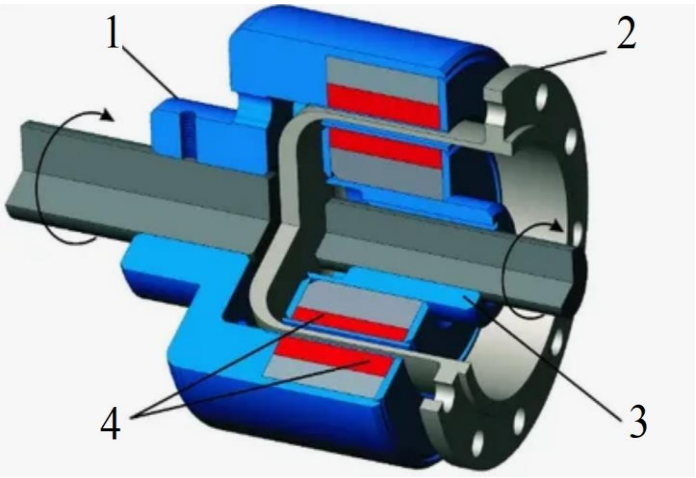


Рис. 2. Радиальная магнитная муфта [2]

Где: радиальная муфта состоит из: 1 – внешняя полумуфта; 2 – разделительная втулка; 3 – внутренняя полумуфта; 4 – магнитная система.

Направление развито недостаточно широко, чтобы утверждать безусловное преимущество одного исполнения над другим и на сегодняшний день тип исполнения муфты напрямую зависит от условий производства и требований, обусловленных предполагаемым местом установки.

Однако была выработана некоторая закономерность: аксиальные муфты применяются в соединениях на “поверхности”, для увеличения простоты и

технологичности ремонта, а различные погружные соединения или насосы – муфтами радиального исполнения.

Отдельно стоит отметить прочие неочевидные варианты передачи кинематических составляющих между сопрягаемыми элементами. Одной из исследуемых моделей стали муфты с применением токов Фуко или – муфты гистерезиса. Их проектирование – длительтный итерационный процесс, зависящий, в первую очередь, от развития и удешевления точных производственных процессов, позволяющих реализовать подобные конструкции за пределами лабораторных кабинетов.

Современное развитие магнитных муфт широко распространяется на каждый элемент, её составляющий. Так-как направление магнитной передачи кинематики между двумя объектами относительно молодо, основные магнитно-кинематические тождества ещё не сформировались в полной мере, и дискуссия внутри научного сообщества остаётся не решёной.

Проведённая работа показала, что вектор исследования современных магнитных муфт направлен на изучение различных магнитных систем магнитных муфт, позволивших бы значительно увеличить эффективность передачи кинематики между сопрягаемыми узлами.

Библиографический список

1. Marchio. C Magnetic Coupling // Stanford Magnet. – Irvine, CA: STMCA, 2024. – С. 81-4.
2. Электромагнитная муфта // Prombuilder URL: ttps://prombuilder.ru (дата обращения: 19.10.2024).
3. Guillaume Beaulieu, Zhaichu Luo, Victor Raposo, Laura J. Heyderman, Pietro Gambardella, Eduardo Martinez, Ales Hrabec Control of spin-orbit torque-driven domain nucleation through geometry in chirally coupled magnetic tracks // ETH Zurich. – 2024. – № 4.0. – С. 16-36.
4. Baiba OSE, Vladislav P., Svetlana O. THE INFLUENCE OF PM’s CONSTRUCTION PARAMETERS IN MAGNETIC COUPLER ON ITs MECHANICAL TORQUE // ResearchGate. – 2011. – № 6. – С. 48–54.
5. What is the Composition of a Magnetic Coupling? // Leyuan Magnets <<Leuan Group Co. ltd>> URL: https://www.leyuangroup.com/ (дата обращения: 14.10.2024).
6. Linda Ye, Matthew E. Sorensen, Maja D. Bachmann, Ian R. Fisher Measurement of the magnetic octupole susceptibility of PrV2Al20 // nature communications. – 2024. – № 15. – С. 1–9.
7. M.M. Ahmed, Islam Eldesoky, Ahmed G. Nasr, Ramsy M. Abumandour, Sara I. Abdelsalam. The profound effect of heat transfer on magnetic peristaltic flow of a couple stress fluid in an inclined annular tube // Modern Physics Letters B. – 2024. – № 38(4). – С. 28–32.

8. Qing-Qi Zeng, Xi-Tong Xu, Enke Liu, Zhe Qu Exchange bias-like behavior due to hidden local magnetic state in a Weyl semimetal // ResearchGate. – 2024. – № 9. – С. 104–125.

9. Применение современных методов моделирования в магнитоприводе герметичных насосов / Г.В. Соболев, М.Ю. Ковалёв, А.Ю. Писаревский, Ю.В. Писаревский // Высокие технологии энергосбережения: труды Междунар. Конф. – Воронеж: Кварта, 2007. – С 186–188.

10. Писаревский А.Ю. Особенности математического моделирования магнитных муфт с кольцевыми постоянными магнитами / А.Ю. Писаревский, Ю.В. Писаревский, В.Б. Фурсов // Электротехнические комплексы и системы управления: науч.-техн. журнал – Воронеж: Кварта, 2008. – 1. – С. 47 – 51.

11. Кононенко К.Е. Моделирование динамики работы герметичного турбомеханизма с магнитной муфтой / К.Е. Кононенко, А.Ю. Писаревский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4. № 3. С. 91–94.

© Мустафин Г.О., 2024

УДК 629.78

Д.А. Насыров
N.D.A.222@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, зав. кафедры Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

СРАВНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Аннотация: в работе представлен сравнительный анализ корпусов ракет-носителей, созданных для всероссийского соревнования CanSat. Рассмотрены четыре типа материалов: бумага, пластик, ПВХ труба и стеклопластик. Описан процесс создания корпуса из представленных материалов. Особое внимание уделено вопросам прочности и аэродинамики.
Ключевые слова: проектирование, ракеты-носители, сравнительный анализ, корпуса, параметры, масса, стоимость, технологичность, материалы.

При проектировании ракет носителей на всеросийское соревнование CanSat было решено провести сравнительный анализ корпусов четырех созданных ракет-носителей по следующим параметрам: масса, стоимость, технологичность. Материалом для корпусов выступили бумага, пластик, пвх труба и стеклопластик. Тактико-технические характеристики ракет приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тактико-технические характеристики ракет-носителей

Материал	Длина, мм	Диаметр головной части, мм	Диаметр донной части, мм	Расположение центра давления относительно обтекателя, мм	Расположение центра массы относительно обтекателя, мм	Площадь стабилизатора, $см^2$
Бумага	812	74	74	612	497	32,78
Пластик	855	74	50	636	514	33,99
ПВХ труба	841	80	80	598	473	62,12
Стеклопластик	772	75	41	540	419	58,14

Стабильность.

Центр тяжести ракеты изменяет свое по положение на траектории полета по мере выгорания топлива. Если он расположен впереди центра давления, ракета считается статически устойчивой. Для достижения необходимого уровня стабильности были использованы стабилизаторы в виде оперения, состоящие из нескольких поверхностей крыльевого типа.

При сравнении сопротивления ракет с постоянным и сужающимся диаметром следует учитывать величину донного сопротивления. На донной поверхности ракеты давление уменьшается за счет эжектирующего действия истекающих из сопл газов. Сопротивление при этом будет возрастать, и ракета с постоянным диаметром, имеющая большую площадь дна, будет проигрывать ракете, имеющей сужающуюся донную часть, не требуя увеличения площади стабилизаторов.

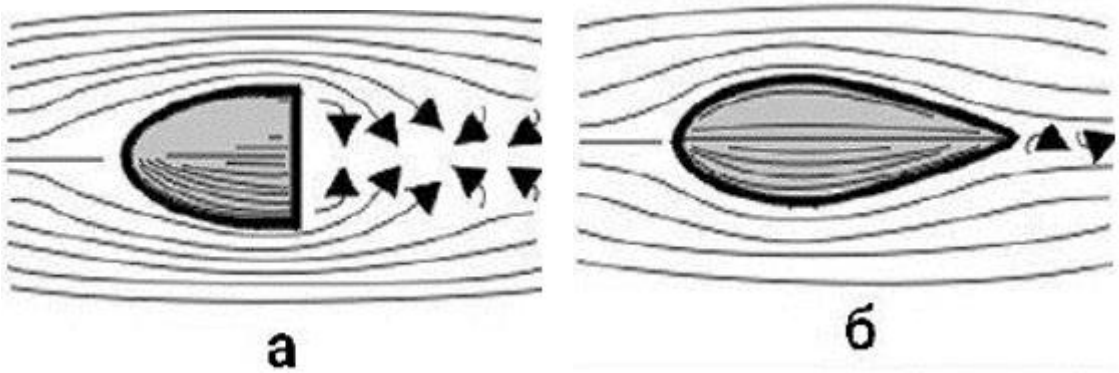


Рис. 1. Пример обтекаемости тел.
а – с сужением; б – без сужения

Производство.

Бумажный корпус модели ракеты создавался с помощью пропитанной полимерным клеем плотной бумаги. В работе использован стандартный ватман А3 и клей: «ПВА». Согласно технологии, уже пропитанным ватманом туго обтянули форму и оставили высыхать на несколько дней. После полного отверждения модели дополнительно увеличили прочностные характеристики с

помощью скотча. Преимуществами данного корпуса является технологичность и низкая масса, что позволяет уменьшить площадь стабилизаторов и, как следствие общую массу ракеты.



Рис. 2. Ракета-носитель из бумаги

При работе над корпусом из пластика наибольшей проблемой была оптимальная проектировка частей корпуса, позволяющая при необходимости быстро заменить вышедший из строя узел. Но несмотря на данный недостаток, при использовании данного метода производства, он позволяет создать сужение двигательного отсека, что позволяет улучшить аэродинамические характеристики, снизить количество необходимого материала и уменьшить массу ракеты

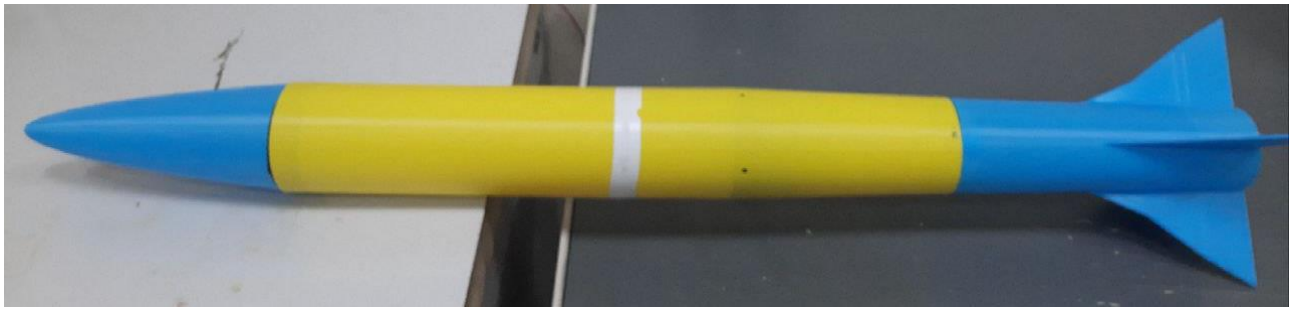


Рис. 3. Ракета из пластика

Собирая корпус из пвх трубы, основной задачей был поиск баланса между увеличением длины корпуса и стабилизаторов. После расчета необходимая длина трубы была отпилена и отшлифована. Далее были просверлены посадочные отверстия для установки других деталей. Достоинством данного корпуса является его высокая технологичность и простота обработки материала. К недостаткам же относятся его высокая масса и отсутствие возможности изменить диаметр двигательного отсека, что сказывается на высоте ракеты.

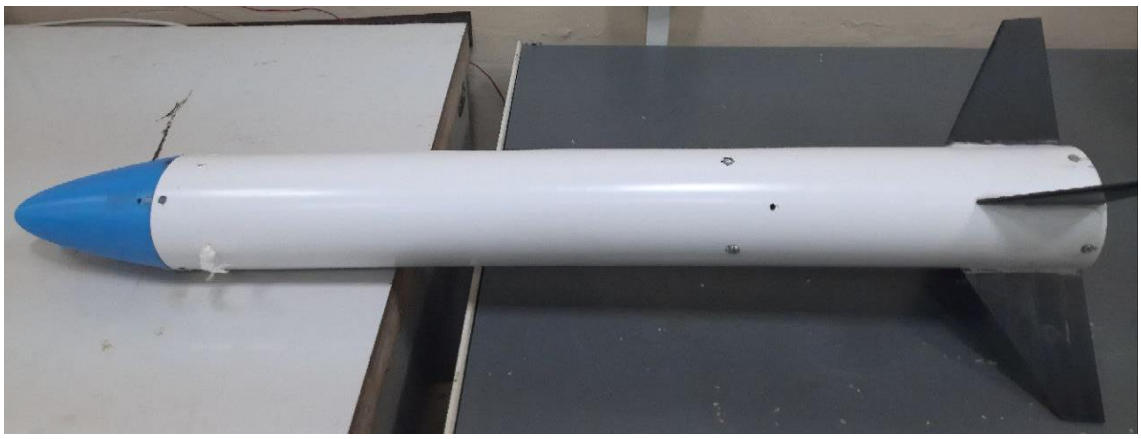


Рис. 4. Ракета из ПВХ трубы

При производстве корпуса из стеклопластика использовали стеклоткань, отвердитель «ПЭПА» и эпоксидная смола «ЭД-20». Смешав эпоксидную смолу с отвердителем в пропорции 10:1, смесь поместили в вакуумную камеру на 3 минуты для удаления воздуха, что позволяет уменьшить дефекты изделия. Далее стеклотканью под углом 45° обматывали форму для застывания, равномерно пропитывая ее смесью. После чего намотали «жертвенный слой» ткани для удаления излишков смеси и оставили высыхать на 5 дней. После полного отверждения корпуса его сняли с отверстия и просверлили необходимые отверстия для установки стабилизаторов и хомута



Рис. 5. Ракета из стеклопластика

По окончании процесса производства, был проведен расчет стоимости производства, взвешивание корпусов и оценка технологичности производства, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Оценка результатов производства

Параметр	Материал корпуса			
	Бумага	Пластик	ПВХ труба	Стеклопластик
Масса	412 гр.	420 гр.	558 гр.	401 гр.
Стоимость	509,00	1065,20	710,00	1 500,00
Технологичность	Высокая	Средняя	Высокая	Низкая

Аэродинамика.

После корректировок масс был проведен расчет полетов в программе openrocket представленные на рисунках 6–9.

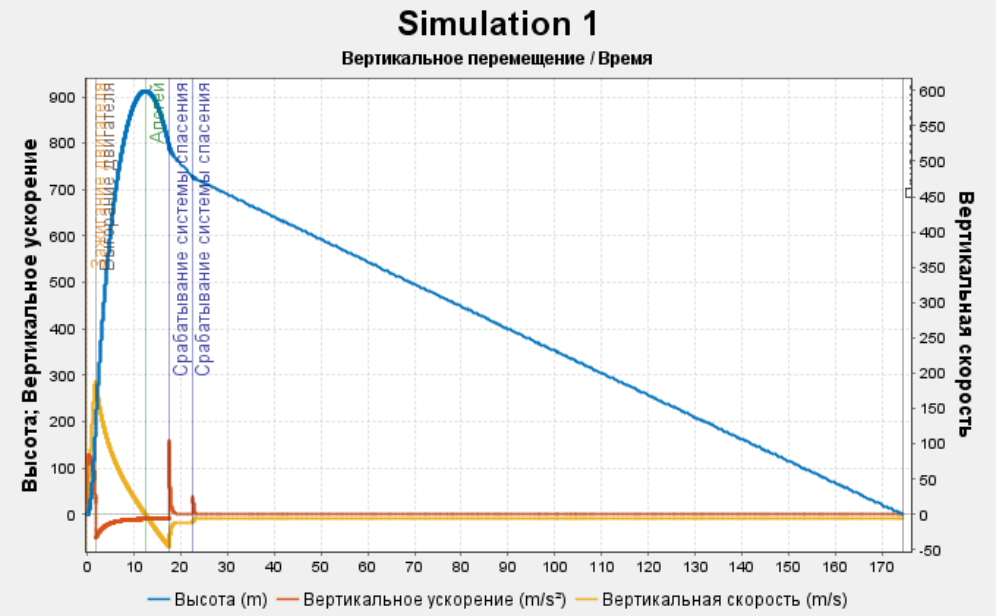


Рис. 6. Симуляция полета ракеты из бумаги

По расчетному графику видно, что апогей ракеты равен 935 метров, что является хорошим результатом для лиги в которой она выступает.

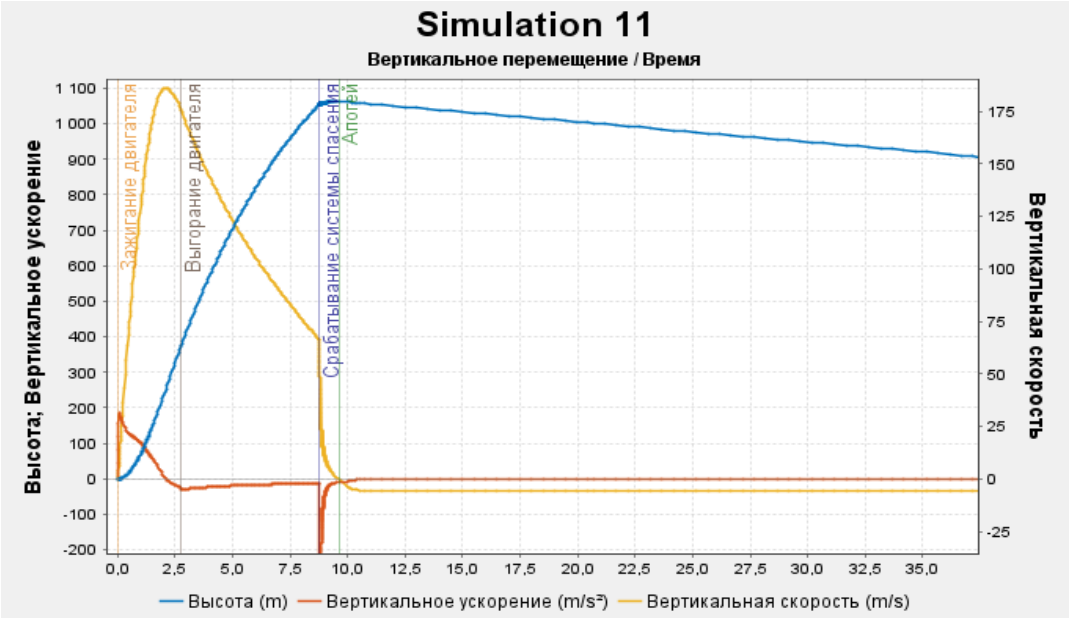


Рис. 7. Симуляция полета ракеты из пластика

По расчетному графику видно, что апогей ракеты равен 1053 метра, что превосходит ракету из бумаги на 118 метров. Это достигается за счет более оптимальных тактико-технических характеристик.

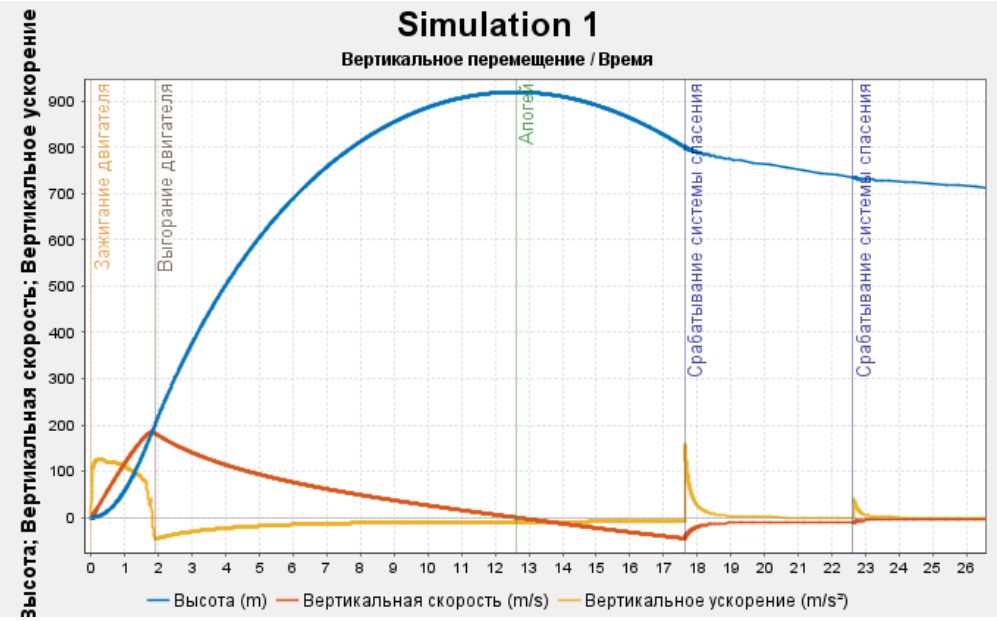


Рис. 8. Симуляция полета ракеты из ПВХ трубы

Ракета из ПВХ трубы достигает апогея на 915 метрах, и является самым низким среди всех ракет-носителей.

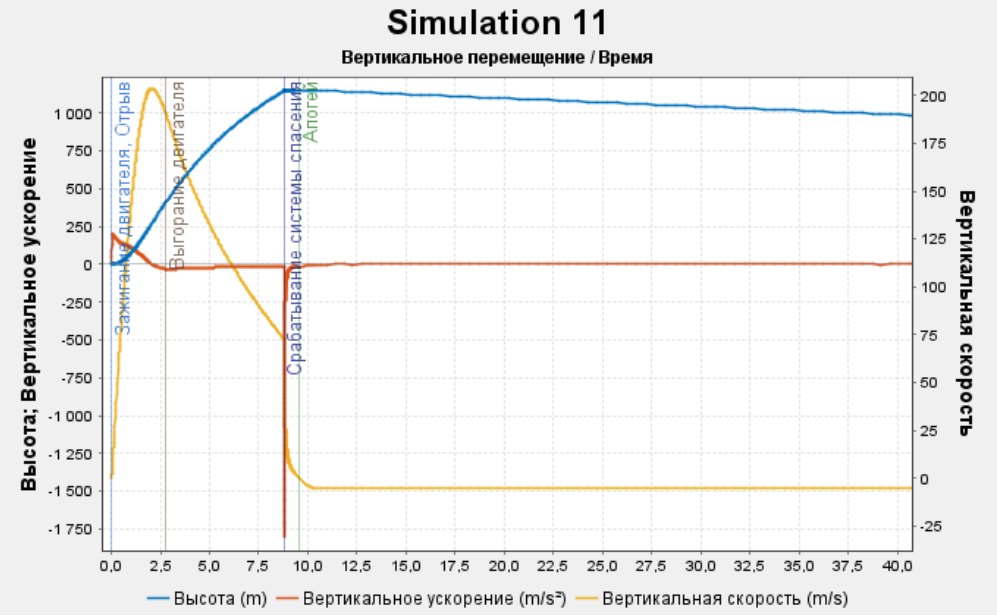


Рис. 9. Симуляция полета ракеты из стеклопластика

Ракета из стеклопластика достигла высоты в 1152 метра, что является максимальным результатом.

Заключение.

По итогам сравнения можно сделать вывод, что наиболее оптимальной будет ракета из пластика или стеклопластика. Они показали низкие параметры массы, 420 и 401 гр. соответственно. Поднялись на максимальную высоту более 1км., а именно 1053 и 1152 м. В свою очередь ракеты из бумаги и ПВХ трубы взлетели на 935 и 915 м. и обладали массой 412 и 558 гр.

Библиографический список

1. Зоншайн С.И. Аэродинамика и конструкция летательных аппаратов: Учебник для несамолетных специальностей авиационных вузов. – М.: Высш. шк., 1968. – 364 с.
2. **Машиностроение. Энциклопедия.** Ред совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М38 М.: Машиностроение. **Ракетно космическая техника.** Т. IV 22 / А.П. Аджян, Э.Л. Аким, О.М. Алифанов и др.; под ред. В.П. Легостаева. В 2 кн. Кн. 1. 2012. – 925 с.

© Насыров Д.А., 2024

УДК 533.666.2

Р.Р. Садртдинов
RomanSadrtd@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. тех. наук, зав. каф. АТиТ Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

СИСТЕМА СПАСЕНИЯ РАКЕТЫ ДЛЯ СОРЕВНОВАНИЙ ВИШ25. ОПТИМИЗАЦИЯ И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация: в данной работе рассмотрены виды систем спасения ракеты, а также система спасения, реализованная на ракете для соревнований ВИШ25.
Ключевые слова: ракета, система спасения, безопасное возвращение, парашют, аэродинамическая поверхность, ракетно-динамическая посадка.

В настоящее время, особенно среди учащихся широкое распространение получило любительское ракетостроение. В рамках работы была подготовлена ракета для соревнований ВИШ25.

Одним из требований конкурса воздушно-инженерной школы является обязательное наличие системы спасения модели ракеты, обеспечивающее приземление конструкции со скоростью не большее 10 м/с. Для обеспечения требования были изучены системы безопасного спуска. На сегодняшний день можно выделить три наиболее актуальных метода:

1. Парашютный;
2. С использованием аэродинамических поверхностей для горизонтальной посадки;
3. Ракетно-динамическая посадка.

Рассмотрим каждую из систем.

Парашютный метод

В этом методе основой является парашют – устройство в форме зонта из ткани или другого мягкого материала, к которому стропами прикреплена ракета.



Рис. 1. Парашют для ракеты для соревнований ВИШ25

В определенный момент парашют раскрывается и тормозит падающею ракету. Формула для расчёта площади парашюта в зависимости от скорости приземления:

$$S = \frac{2mg}{Cd\rho V^2} \quad (1)$$

где S — площадь парашюта;
m — масса ракеты вместе с парашютом;
g — ускорение свободного падения;
Cd — коэффициент лобового сопротивления парашюта;
ρ — плотность воздуха;
V — скорость спуска;

Главное преимущество парашютного метода — простота.

Изделия, где используется парашютный метод:

1. Rocket Lab Electron;
2. Твердотопливные ускорители системы Спейс Шаттл;
3. Многие модельные ракеты.

Использование аэродинамических поверхностей для горизонтальной посадки

В этом методе основой являются аэродинамические поверхности – поверхность летательного аппарата (крыло, оперение, рули и др.), при взаимодействии которой с воздушной средой в полёте возникают силы, воздействующие на движение аппарата. В случае с ракетой это могут быть крылья с управляющими поверхностями. Принцип действия этого метода: в некоторый момент ракета из вертикального полета переходит в горизонтальный и возвращается на землю подобно самолету. Метод сложнее парашютного, так-как для него требуется более точное управление, а также сами крылья с управляющими поверхностями. Это приводит к увеличению массы ракеты, а

значит и к снижению массы полезной нагрузки. К тому же требуется ровная посадочная полоса. Но благодаря этому методу можно добиться мягкого и точного возвращения ракеты.



Рис. 2. Аэродинамические поверхности на МТКС «Буран»

Ракеты, где используются аэродинамические поверхности для горизонтальной посадки:

1. МТКС «Буран»;
2. МТКС «Спейс Шаттл»;
3. Проект «Байкал».

Ракетно-динамическая посадка

В этом методе основой являются двигатели ракеты и вспомогательные аэродинамические поверхности, например, решетчатые рули. Принцип действия этого метода: в некоторый момент ракета начинает ориентировку двигателями вниз находясь в состоянии свободного падения. На некоторой высоте включаются двигатели, нивелируя скорость падения, и ракета приземляется с практически нулевой скоростью в вертикальном положении. Этот метод ещё сложнее чем метод с использованием аэродинамических поверхностей. Здесь требуется точная работа двигателя, возможность его включения-выключения, а также вспомогательные аэродинамические поверхности для ориентировки в процессе приземления. Главное преимущество ракетно-динамической посадки – точное и мягкое возвращение ракеты на землю. Однако этот метод неприменим для твёрдотопливных ракет, где невозможно повторное включение и выключение двигателя во время полета.

Ракеты, где используется ракетно-динамическая посадка:

1. SpaceX Falcon 9;
2. SpaceX Starship;
3. Blue Origin New-Glenn;
4. Союз-7.



Рис. 3. SpaceX Falcon 9 совершает мягкую посадку на платформу

Выбор метода спасения

Наиболее подходящим для спроектированной модели ракеты, из-за его простоты и относительной надежности, является парашютный метод. Применение аэродинамических поверхностей нерационально сложно, а ракетно-динамическая посадка невозможна из-за ограничения твердотопливного двигателя.

Парашютный метод спасения, реализованный на ракете для соревнований ВИШ25

Для начала была выбрана форма парашюта, так-как это сказывается на его массе. Самым эффективным считается прямоугольная из-за большой площади. Однако она и самая тяжелая. Для ракеты оптимальным оказался парашют шестиугольной формы. Его преимуществом стала возможность прикрепить шесть строп, что улучшало надежность, так-как при отрыве нескольких строп парашют оставался бы эффективным.

Произведем расчет площади парашюта. Зная примерную массу ракеты $m = 1.1$ кг, ускорение свободного падения $g = 9.8$ м/с^2, коэффициент лобового сопротивления парашюта $Cd = 0.8$, плотность воздуха $\rho \approx 1.2$ кг/м^3, скорость спуска $V < 10$ м/с рассчитаем площадь.

Подставляя значения в формулу, получаем значения площади парашюта. Также, зная форму парашюта, а это правильный шестиугольник, можно найти расстояние между сторонами парашюта.

$$d = \sqrt{\frac{2S}{\sqrt{3}}} \qquad (2)$$

где d — расстояние между сторонами;
S — площадь парашюта.

Также произведем эти расчеты. Для удобства занесем данные в таблицу 1 и построим график, отображённый на рисунке 2.

Таблица 1

Размеры парашюта в зависимости от скорости спуска

V, м/с	S, м^2	d, см
10	0.224	50
9	0.227	51.2
8	0.351	63.6
7	0.458	72.7
6	0.623	84.8
5	0.898	101.8
4	1.4	127.1
3	2.49	169.5
2	5.61	254.5
1	22.45	500

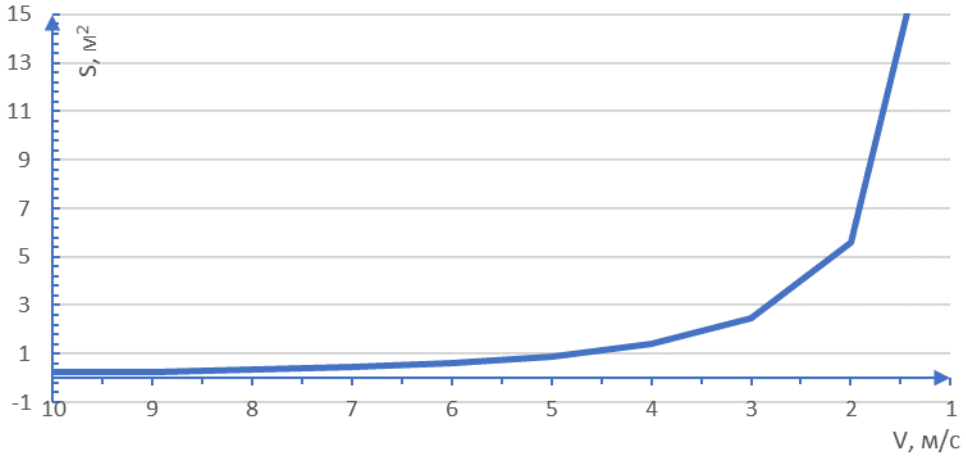


Рис. 2. График зависимости размера парашюта от скорости спуска.

По графику видно, что изменение по мере уменьшения скорости становится более резким. Проанализировав полученные значения, был выбран парашют, площадью в 0.9 м^2. Это оптимальный парашют по массе и габаритам.

Выбрав парашют, осталось разработать систему его выпуска. Для этого был собран поворотный механизм на штифтах, которые удерживали обтекатель с корпусом ракеты. Поворачивать механизм должен сервопривод при определенных условиях. Этими условиями являются точка наибольшего удаления ракеты от земли, или относительная скорость приблизительно равная нулю. В электронной части ракеты каждые 0.5 с обновляются данные,

получаемые с датчиков, и ведутся преобразования этих данных в косвенные значения высоты и скорости. Для расчета высоты используется преобразованная барометрическая формула:

$$h = -\frac{p_0 \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)}{\rho g} \quad (3)$$

где p_0 — атмосферное давление на уровне старта ракеты;
p — атмосферное давление на текущей высоте;
ρ — плотность воздуха;
g — ускорение свободного падения.

Текущая скорость полета находится по следующей формуле:

$$V = V_0 + at \quad (4)$$

где V_0 — начальная скорость полета по отношению к предыдущему обновлению;
a — ускорение;
t — время обновления.

Когда высота становиться примерно максимальной или скорость движения примерно равной нулю, сервопривод получает команду повернуться на определенный градус, в случае ракеты на 35˚. Тогда ракета и её обтекатель разъединяются и парашют вылетает. После потоки воздуха его раскрывают и парашют начинает тормозить. Одновременно с этим активируется пищалка, благодаря которой обнаружение ракеты становится более простым.

Заключение

В рамках НИР было проведено исследование видов спасения ракет.
В результате были проанализированы реально существующие методы безопасного возвращения.
Было выяснено, что скорость спуска влияет на габариты парашюта. Чем меньше скорость, тем больше его площадь и диаметр.
Было выяснено, что форма парашюта влияет на его характеристики. Но у каждого парашюта есть свои преимущества и недостатки, так что однозначно лучшей формы нет.
Был определен оптимальный способ возвращения для ракеты, предназначенной для соревнований ВИШ25.

Библиографический список

1. Многоразовость. Как ракете вернуться целой после полёта? // Хабр URL: https://habr.com/ru/articles/517132 (дата обращения: 12.11.2024).

2. Как математика может спасти вашу жизнь: уравнение парашюта // Вокруг Света URL: https://www.vokrugsveta.ru/articles/kak-matematika-mozhet-spasti-vashu-zhizn-uravnenie-parashyuta-id735263/ (дата обращения: 12.11.2024).

3. Закон Больцмана // Студворк URL: https://studwork.ru/spravochnik/fizika/zakon-bolcmana (дата обращения: 12.11.2024).

© Садртдинов Р.Р., 2024

УДК 621.444

Р.Р. ХАФИЗОВ
Ravil_hafi@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент каф. АТиТ К.Е. РОЖКОВ

Уфимский университет науки и технологий

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СТУПЕНИ СВОБОДНОЙ ТУРБИНЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КПД

Аннотация: в настоящей работе представлен расчет рабочей лопатки первой ступени свободной турбины авиационного двигателя. Рассмотрена возможность применения различных уплотнений между ротором и статором турбины.
Ключевые слова: газотурбинный двигатель; КПД, газодинамический расчет, свободная турбина, турбина, энергия, лабиринтные уплотнения.

Одной из главных задач в области технического развития и совершенствования газотурбинных двигателей является повышение коэффициента полезного действия (КПД). КПД играет важную роль в эффективности работы системы и определяет ее энергетическую эффективность. Его можно повысить различными методами, совершенствуя разные узлы двигателя. Одним из подходов является работа над лабиринтными уплотнениями в свободной турбине (СТ). Это позволит уменьшить количество перетечек между статорной и роторной частью турбины. Прототипом двигателя, на основе которого строится работа является двигатель АЛ-31СТЭ. Газотурбинная установка используется для совместной работы с электрогенератором.

В программе DVIGwT создана модель двигателя прототипа. На рисунке 1 указана модель, а в таблице 1 показаны результаты расчета.

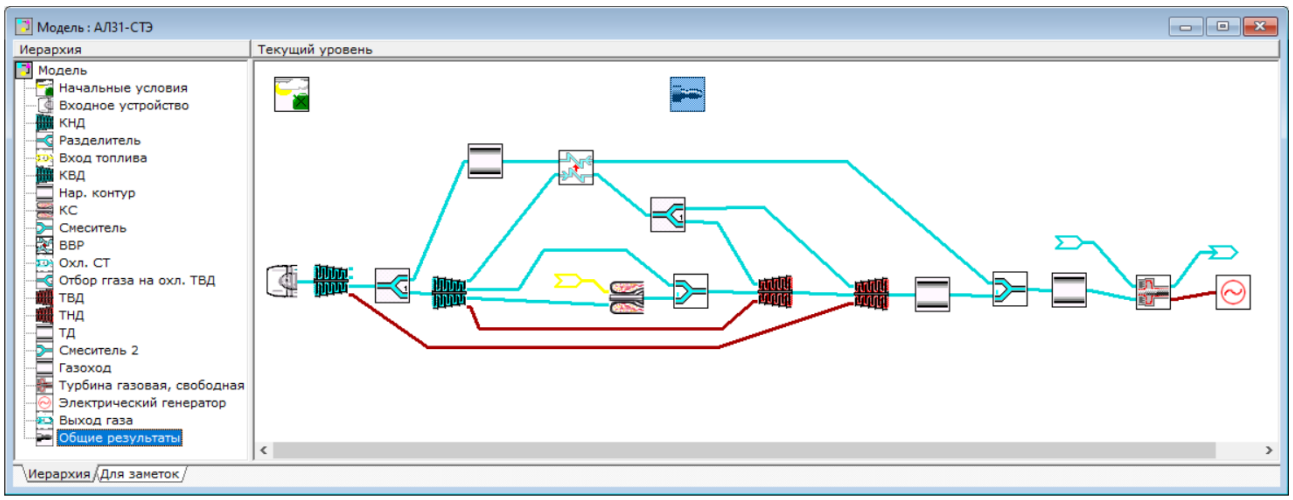


Рис. 1. Математическая модель АЛ-31СТЭ

Таблица 3

Результаты расчета математической модели в программе DVIGwT

Результаты расчёта элемента модели "Общие результаты":	
Абсолютный электрический кпд, [%]	35,59541
Погрешность расчета расхода топлива, [%]	3,13597
Суммарная степень повышения давления, [-]	17,56198
Суммарная степень понижения давления, [-]	14,57202
Суммарный расход воздуха, [кг/сек]	66
Суммарный расход топлива, [кг/сек]	1,032998
Удельная мощность, [кВт*с/кг]	274,725
Удельный расход топлива	0,2051
Электрическая мощность установки, [кВт]	18131,85

На основе данных из таблицы 1 была спроектирована первая ступень рабочего колеса свободной турбины. Используя современные методики расчета, а также программное обеспечение КОМПАС-3D была создана трехмерная модель. На рисунке 2 показан сектор первой ступени рабочего колеса свободной турбины.

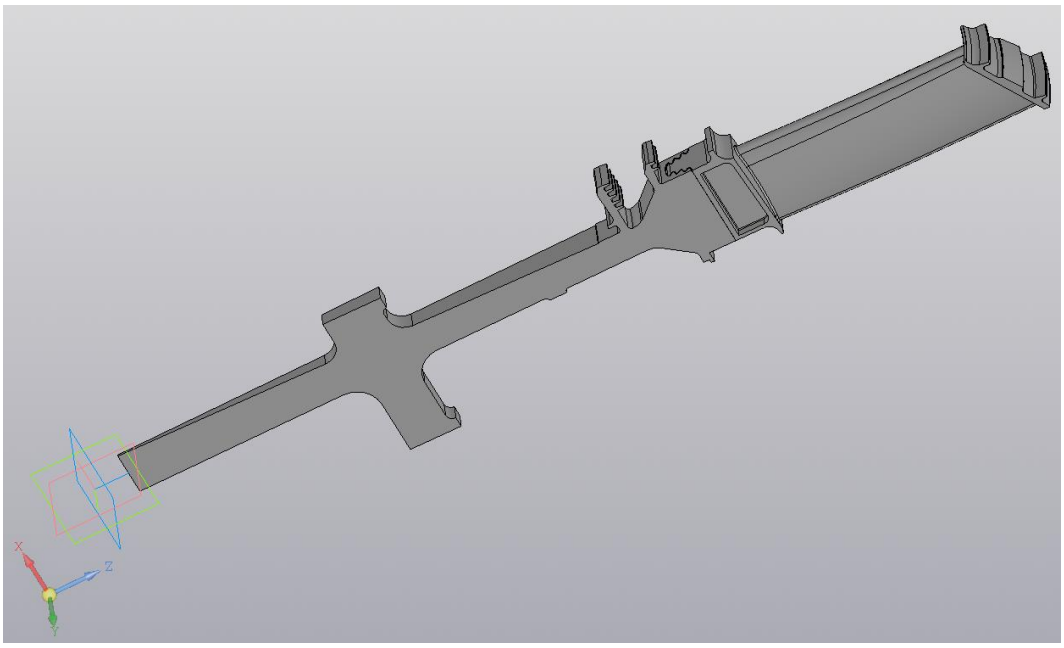


Рис. 2. Трехмерная модель сектора 1 ступени свободной турбины

Для дальнейшего расчет используем программное обеспечения компании ANSYS. Произведен газодинамический расчет в программе ANSYS TurboGrid и построена сетка рабочей среды, изображенная на рисунке 3.

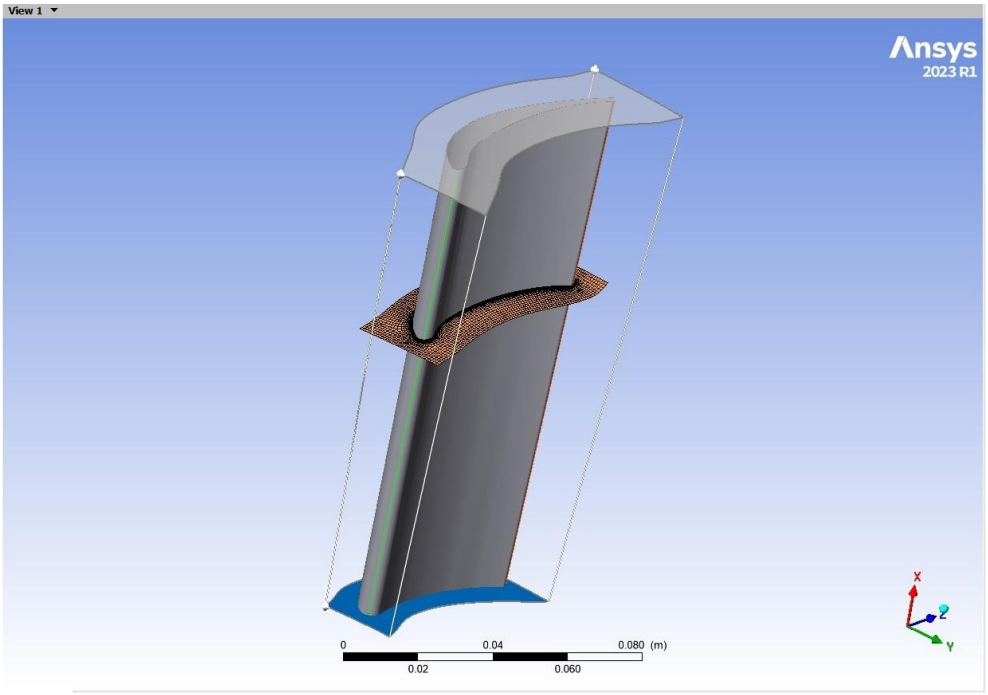


Рис. 3. Сетка рабочей зоны в ANSYS TurboGrid

Используя программное обеспечение ANSYS CFX, были построены поля давлений и температур на самой лопатка. Это позволяет определить КПД лопатки, который составил 89,89%. На рисунках 4 и 5 показаны поля давлений и температур соответственно.

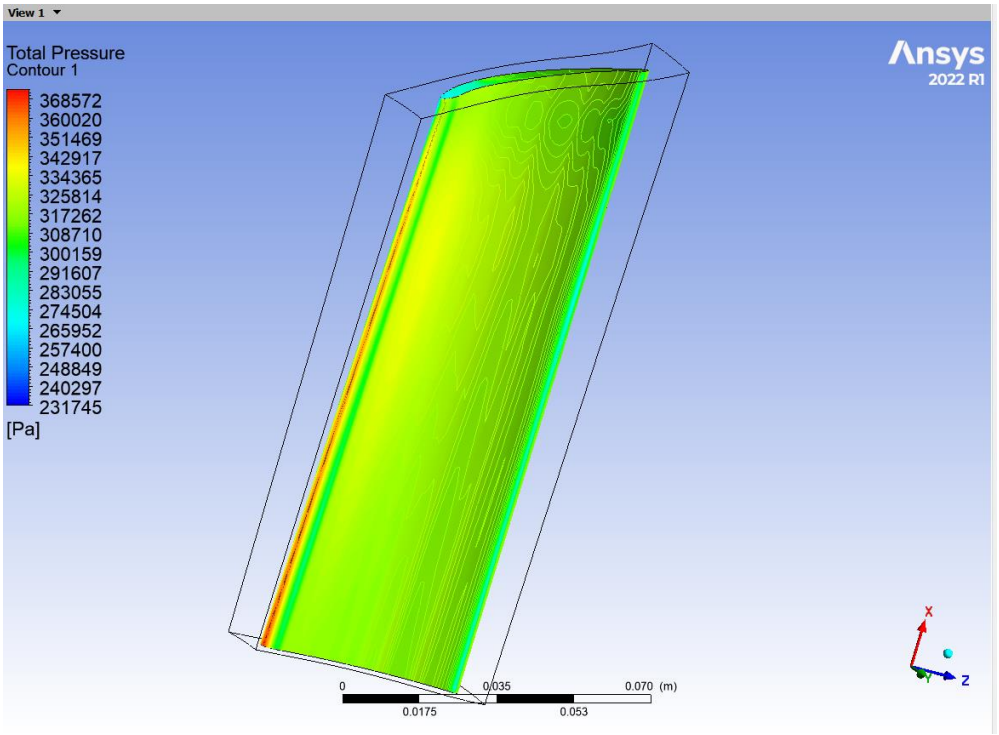


Рис. 4. Поле давлений, создаваемое потоком на пере лопатки

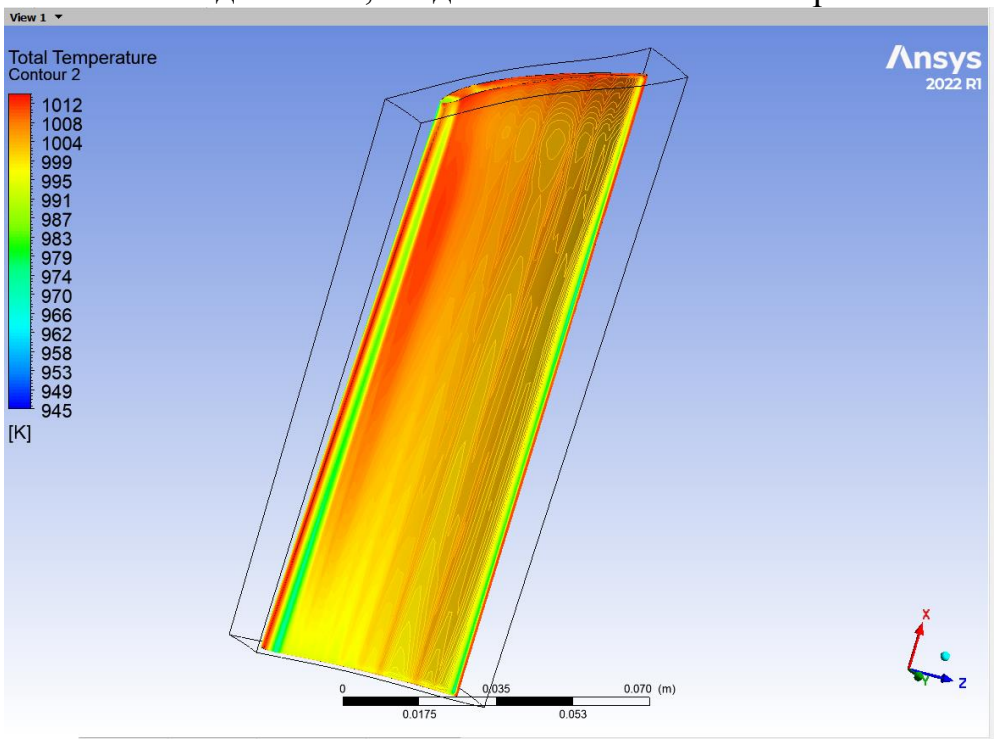


Рис. 5. Поле температур, создаваемое потоком на пере лопатки

Для каждой лопатки имеется свой запас прочности. Для расчета запаса прочности используется программа ANSYS Static Structural. На рисунке 6 показаны условия фиксации рабочей лопатки.

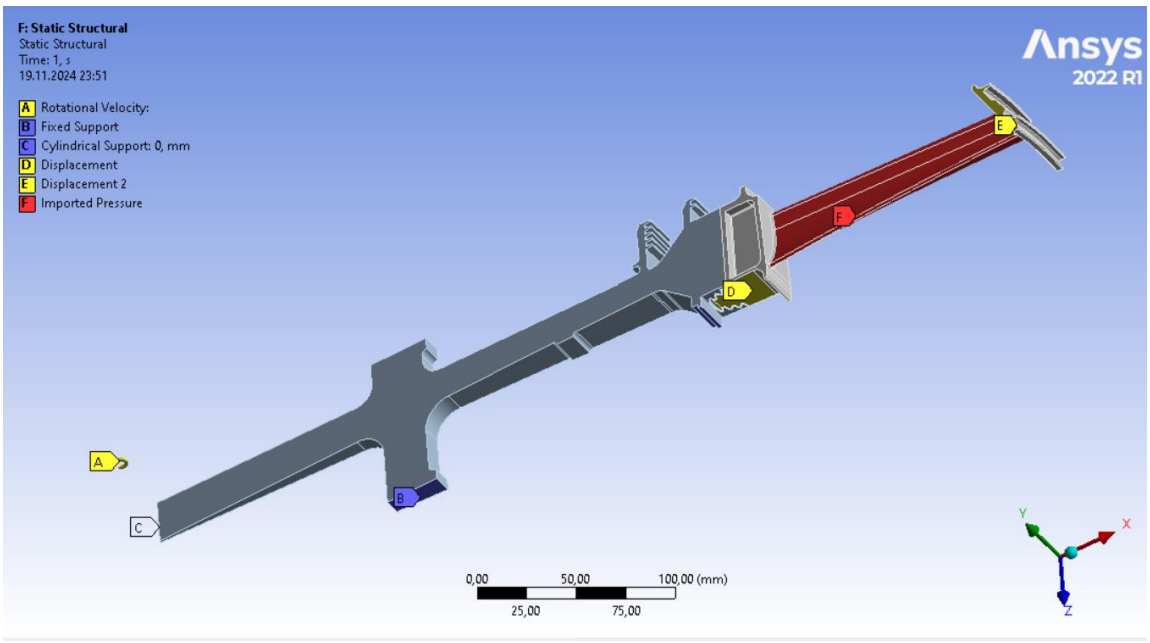


Рис. 6. Условия фиксации

Коэффициент запаса прочности для рабочих лопаток турбин составляет порядка 1,2-1,4. На основе данной информации оценивается прохождение лопатки по критерию. На рисунке 7 показан результат расчета коэффициента запаса прочности.

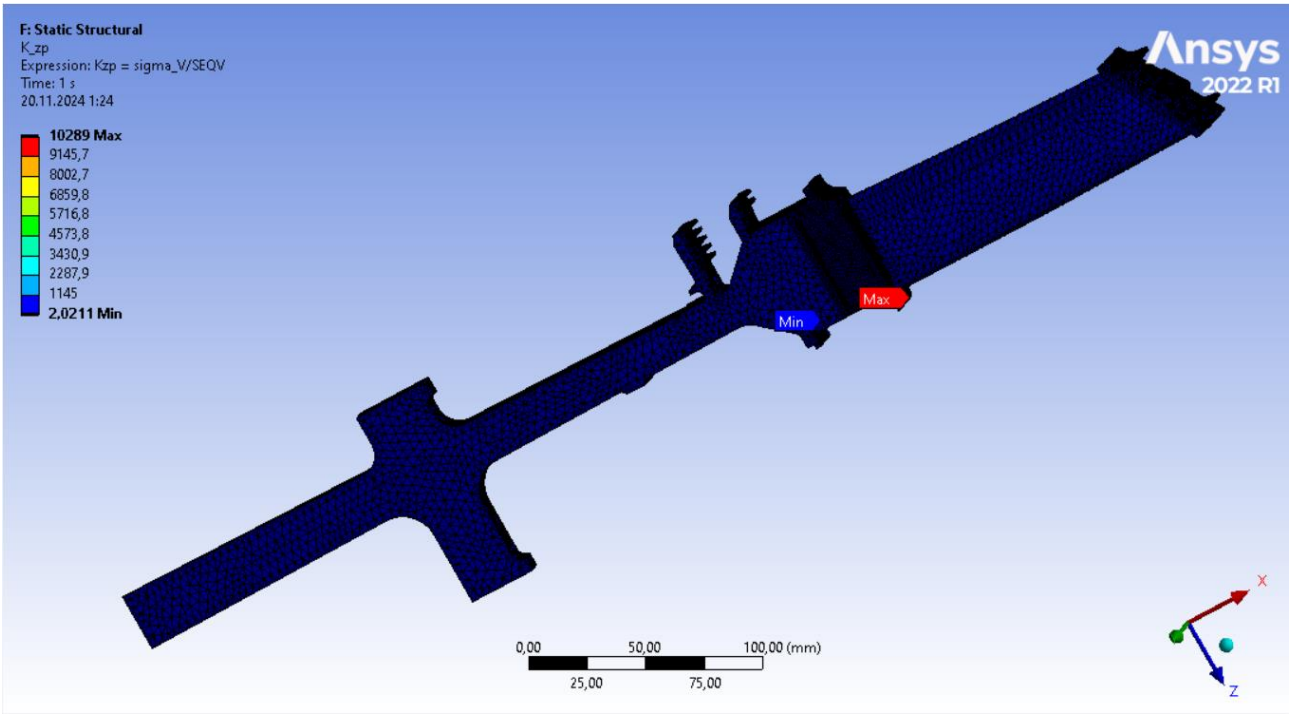


Рис. 7. Коэффициент запаса прочности лопатки

Минимальный коэффициент запаса прочности составил $k_{zp} = 2{,}0211$. Лопатка прошла по критерию прочности. А это значит, что данная лопатки может использоваться для дальнейших рассчетов.

Для повышения общего КПД можно изменить лабиринтное уплотнение на бандажной полке лопатки. Благодаря этому перетечки между ротором и статором можно уменьшить, а значит лопатка совершит больше болезной работы, а, соответственно, и повысится коэффициент полезного действия.

В авиационных турбинах используют различные типы лабиринтных уплотнений между статором и ротором турбины, такие как:

- с прямыми гребешками;
- с наклонными гребешками;
- с уступами напротив гребешков;
- с уступами во впадинах гребешков;
- с наклонными ступенчатыми гребешками.

В дальнейшем будут рассмотрены данные варианты и рассчитаны соответственно наиболее эффективных. В варианте прототипа рассмотрен вариант с прямыми гребешками. КПД, рассчитанный с помощью ANSYS CFX, составил 89,89%.

Библиографический список

1. Ржавин Ю.А., Емин О.Н., Карасев В.Н. Выбор параметров и газодинамический расчет осевых компрессоров и турбин авиационных ГТД: Учебное пособие. – М.: «Дипак» 2003 г., 156 с.

2. Кривошеев И.А., Рожков К.Е., Симонов Н.Б. Получение и использование обобщённых зависимостей при проектировании и доводке турбокомпрессоров газотурбинных двигателей: научная статья – Уфа: УГАТУ, 2022.

3. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. – Учебник для студентов вузов по специальности "Авиационные двигатели". 2-е издание., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с., ил.

4. Газодинамический расчет осевой газовой турбины / Г.В. Павленко, А.Г. Волов. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 76 с.

5. Проектирование свободной турбины в составе многокаскадной турбины ГТД [Электронный ресурс]: электрон. метод. пособие / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т. С.П.Королёва (нац. исслед. ун-т); сост. О.В. Батурин, В.Н. Матвеев, Г.М. Попов – Электрон. текстовые и граф. дан. (1,2Мб). – Самара, 2013.

6. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин. – Самара: ФГУП «Изд-во «Самарский Дом печати», 2003. – 336 с.

© Хафизов Р.Р., 2024

УДК 533.666.2

П.А. НУГАЕВ, А.Д. ГЕНЕРАЛОВ
nugaefpavel@yandex.ru
Науч. руководов. Руководитель канд. тех. наук, зав. каф. АТиТ
Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

РАКЕТА НА БАЗЕ РД-100 ДЛЯ СОРЕВНОВАНИЙ ВИШ25. ОПТИМИЗАЦИЯ И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация: в настоящей работе приведены принцип создания ракеты в рамках положения всероссийского чемпионата воздушно-инженерной школы на 2024 год, пути оптимизации и обоснование конструкции, а также теоретические расчеты и моделирование полёта.
Ключевые слова: ракетостроение; ракетные двигатели; аэродинамика; моделирование; OpenRocket; 3D-печать; оптимизация; система спасения.

В последние годы наблюдается стремительный рост популярности любительского ракетостроения [6]. Популяризация этого хобби способствует росту интереса к техническим дисциплинам (наука, технология, инженерия, математика), формированию инженерного мышления и подготовке будущего поколения специалистов в области аэрокосмической промышленности.

Целью данной работы является создание ракеты с системой спасения в рамках соревнований «ВИШ25», аналитическая оптимизация конструкции, обеспечивающая максимальную эффективность полёта ракеты.

Выбор двигателя для ракеты

Были проведены сравнительные исследования модельных ракетных двигателей РД-300[1] и РД-100[2]

- РД-100: масса около 180 гр. имеет суммарный импульс около 100-110 Н*с, длительность работы двигателя около 1.5 секунд.
- РД-300: масса около 440 гр. имеет импульс тяги около 280–300 Н*с, работает на длительность работы двигателя около 2.5 секунд.

Для данной ракеты был выбрал двигатель РД-100 из-за его низкой цены и компактности.

Моделирование ракеты

Дальнейшая конструкция ракеты будет спроектирована с учетом требований соревнований ВИШ25 на Лигу «Младший ГИРД».

В началемодель ракеты проектируется в специализированной программе OpenRocket[3][4]. Были определены размеры составляющих, форма обтекателя и общая компоновка составляющих. При проектировании ракеты были учтены

следующие факторы: стабильность полета, устойчивость к воздушным потокам, достижение максимально возможной высоты полёта, прочность ракеты.

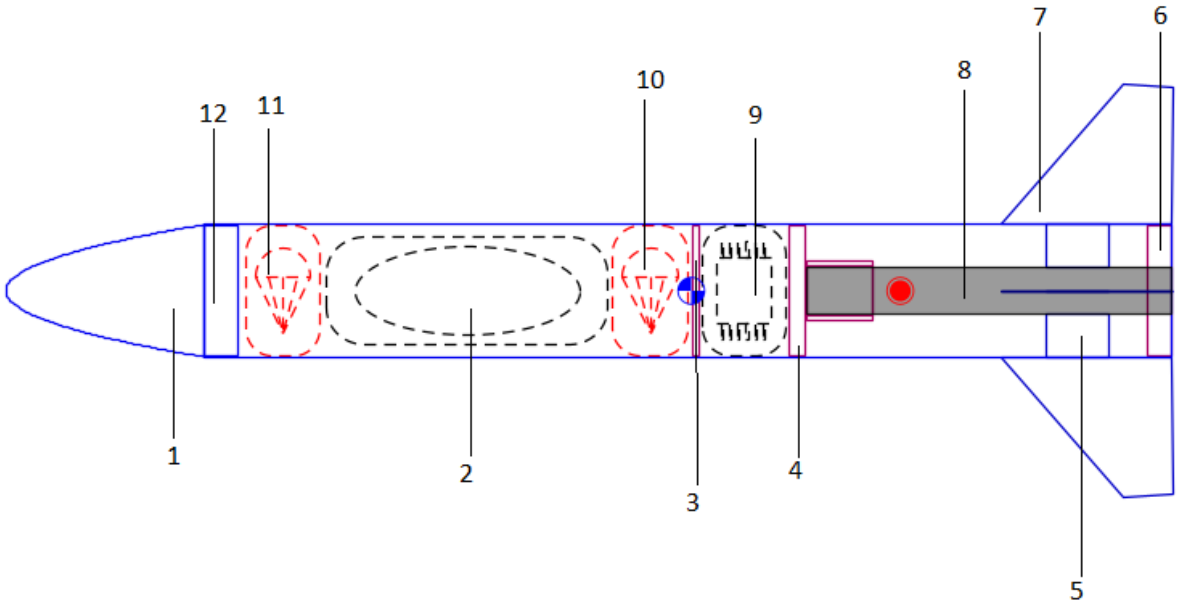


Рис. 1. Схема ракеты в программе OpenRocket. *1* – обтекатель; *2* – полезныый груз; *3* – переборка; *4* – упор двигателя; *5* – крепёж для стабилизаторов; *6* – центрирующее кольцо; *7* – стабилизатор; *8* – дигатель; *9* – бортовой компьютер; *10* – парашют для спуска ракеты; *11* – парашют для спуска полезного груза; *12* – разделительный механизм

Для оптимизации конструкции ракеты необходимо учитывать несколько ключевых факторов:

• масса: Использование легких компонентов, используя 3D-печать для изготовления деталей, минимизируя общую массу ракеты;

• аэродинамика: Оптимизация формы обтекателя и стабилизаторов для снижения аэродинамического сопротивления и повышения стабильности полета;

• прочность: Укрепление корпуса и других компонентов ракеты для обеспечения надежности и безопасности при запуске и полете;

• надежность: Выбор качественных материалов и компонентов, а также применение проверенных технологий сборки.

Чтобы минимизировать сопротивление воздуха, нужно иметь правильно изготовленный обтекатель, чтобы уменьшить аэродинамическое сопротивление и повысить стабильность полета. Обтекатели имеют разные формы: конический, стреловидный, степенной, параболический, эллипсоид и хаака.

Обтекатель *(3)* уменьшает аэродинамическое сопротивление и повышает стабильность полета. Он должен быть изготовлен из легкого и прочного материала, и иметь обтекаемую форму, чтобы минимизировать сопротивление воздуха [5]. В программе OpenRocket была рассчитана сила аэродинамического

сопротивления при максимальной скорости ракеты от формы обтекателя. Сравнительные исследования силы аэродинамического сопротивления от формы обтекателя приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Форма обтекателя	Сила аэродинамического сопротивления, Н
Коническая	41.3
Стреловидная (параметр формы 0.5)	38.5
Эллипсоидная	39
Степенная (параметр формы 0.5)	36.75
Параболическая (параметр формы 0.5)	36.425

Параболическая форма оказалась наиболее подходящей благодаря наименьшей силе аэродинамического сопротивления. Чем сила меньше – тем меньше сопротивление воздуха.

Были продуманы система спасения ракеты после отделения полезной нагрузки и система спасения самой полезной нагрузки. Система спасения ракеты состоит из парашютной системы (10)(11) и разделительного механизма (12).

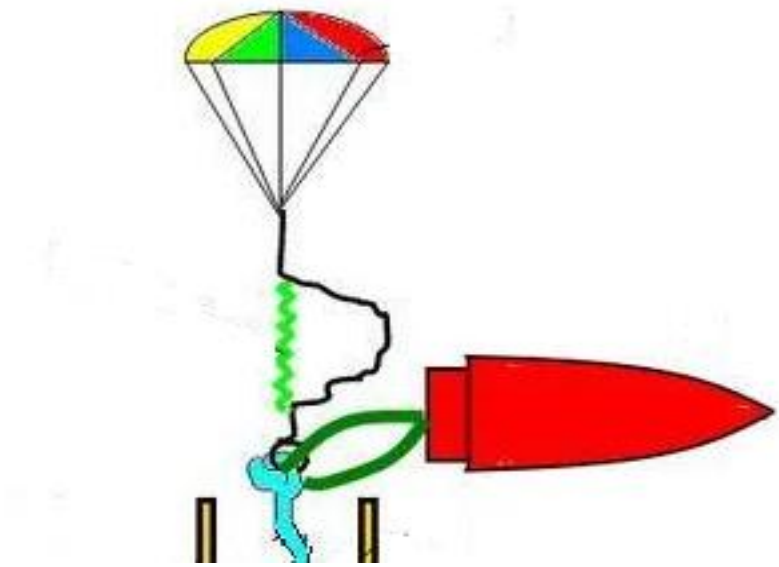


Рис. 2. Крепление обтекателя после вылета, крепление парашюта с амортизатором

На краях корпуса закрепляется механизм катапульты из резинки, закрепленной чуть ниже выступа обтекателя, и переборки (3), расположенной над бортовым компьютером. Разделительный механизм (12) работает за счёт сервопривода SG90 и металлических штифтов. Сервопривод проворачивает четыре штифта, когда получает сигнал от бортового компьютера (9) о достижении апогея или через радиомодуль при нештатной ситуации.

Штифты, закрепляющие обтекатель и корпус ракеты, втягиваются в корпус, после чего обтекатель (1) под давлением катапульты выталкивается наружу, после – вылетает система полезной нагрузки (2)(11) и парашют ракеты(10).

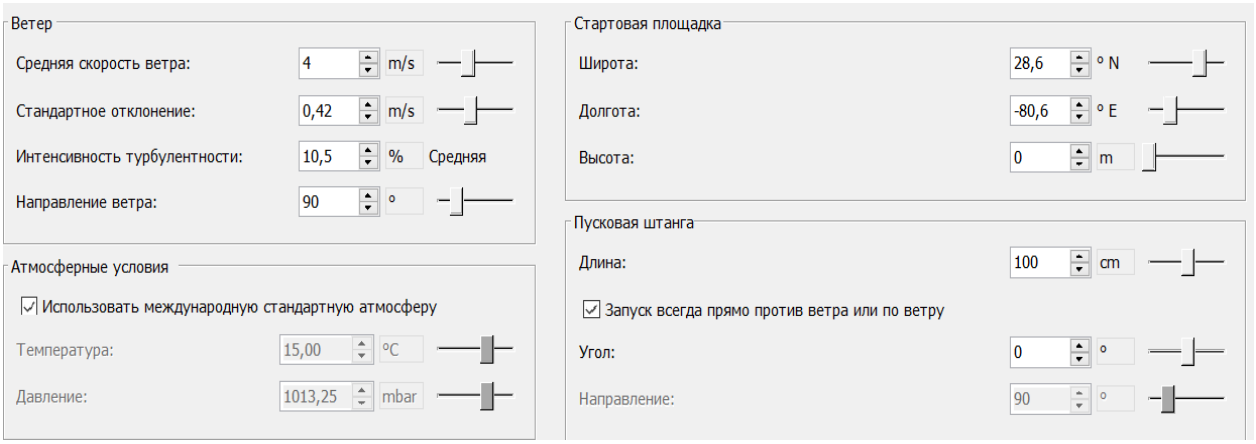


Рис. 3. Задание условий моделирования запуска

На рисунке 3 были проведены расчеты траектории полета и моделирование ее поведения в воздухе на. Значения условия запуска равны показателям летнего дня с небольшим ветром. Это позволило определить скорость полёта, ускорение, отклонение полёта, точку апогея. Благодаря расчётам мы можем изменить форму обтекателя и стабилизаторов для лучшего результата полёта ракеты.

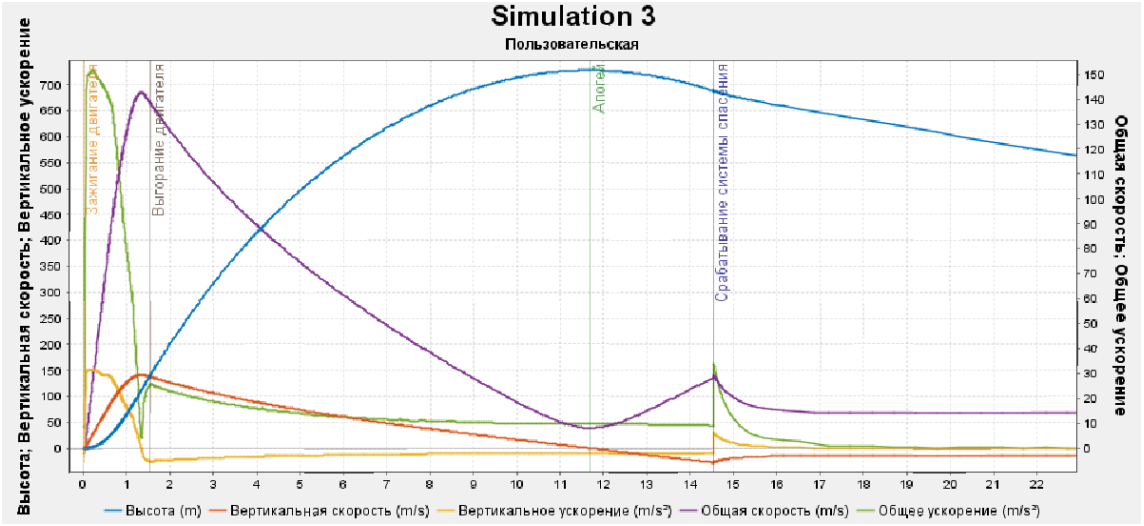


Рис. 4. Расчёт полёта ракеты с показателями высоты, вертикальной скорости, вертикального ускорения, общей скорости и ускорения

В качестве корпуса была использована полипропиленовая труба диаметром 80мм из-за своей дешевизны, прочности и удобности в обработке.

В бортовом компьютере (9) были задействованы: плата Arduino Nano, датчик атм. давления и температуры BMP280, гироскоп MPU6050, модуль карт-ридера MICRO SD, радиомодуль NRF24L01

Компоновка

В результате оптимизации ракета должна обладать достаточной стабильностью полета, минимально возможной массой и обеспечить

максимальное достижение высоты. В разработке были задействованы компоненты, приведенные в Таблице 1.

Составные части ракеты

Таблица 1.

Корпус	Канализационная труба (полипропилен), 600х80 мм.
Двигатель	РД-100, 220х29 мм.
Обтекатель	Степенная форма (0,5), PLA-пластик, 120х80 мм.
Упор двигателя-хомут	PLA-пластик, 10х78 мм
Центрирующее кольцо	PLA-пластик, 5х78мм
Переборка	PLA-пластик корпуса 60х78мм.
Полезная нагрузка	Груз 220х66 мм
Парашют для основы ракеты	Нейлоновый рип-стоп, D1000 мм, 8 строп по 800 мм.
Парашют для полезной нагрузки	Нейлоновый рип-стоп, D500мм, 6 строп по 350 мм.
Механизм катапульты	Резинка эластичная тканевая; PLA-пластик платформы d=75мм
Разделительный механизм	Сервопривод SG90; PLA-пластик корпус 50xd72 мм
Сухая масса (без двигателя):	1 кг.

После корректировок модели были смоделированы в КОМПАС-3D для дальнейшей 3D-печати, что позволит создать детали с высокой точностью. Детали ракеты были напечатаны на 3D-принтере из PLA-пластика.

Преимущества 3D-печати: Возможность создания сложных геометрических форм, высокая точность, минимизация затрат на производство, возможность быстрой корректировки конструкции.

Недостатки 3D-печати: Ограничения по размеру и прочности деталей, скорость печати, стоимость оборудования.

Заключение

Модель ракеты была спроектирована с учётом оптимизации аэродинамики. Был проведён анализ полёта, который показал хорошие показатели. После сборки ракеты были проведены испытания систем. Испытание полётом пока не проводилось.

В качестве рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкции можно выделить следующие:

- проведение испытаний ракеты для определения оптимального баланса массы и тяги;

- разработка системы управления для более точного управления направлением полета ракеты;
- использование более легких и прочных материалов для изготовления деталей;
- применение дополнительных средств безопасности, таких как парашютная система резервного копирования.

Библиографический список

1. Двигатель РД1-100 // URL: https://real-rockets.ru/shop/motor-rd1-100-7m/
2. Двигатель РД1-300. // PODARINI.RU: интернет-маг. URL: https://podarini.ru/modelnye-raketnye-dvigateli/modelnyy-raketnyy-dvigatel-rd1-300-7/
3. Как построить модель ракеты // URL: https://masteraero.ru/modeli_raket-36.php
4. О моделировании ракет // URL: https://dzen.ru/a/YHWnhPRZ7y15bcf1
5. Зоншайн С.И. Аэродинамика и конструкция летательных аппаратов: Учебник для несамолетных специальностей авиационных вузов. – М.: Высш. шк., 1968. – 364 с.
6. Курс повышения квалификации «Проектная деятельность для школьников на примере ракетостроения» // GOROCKET.RU : «Реактивное движение», 2022. URL: https://www.gorocket.ru/rocket_course

© Нугаев П.А., 2024

УДК 621.1.016

Д.А. ТОМИНА
ditomina@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ПОДАЧИ СПГ В ГТУ НА ПАРАМЕТРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ

Аннотация: в данной статье рассматриваются различные способы подачи СПГ в ГТУ АЛ-31СТ, как способ подачи влияет на параметры эффективности работы установки, а также экономический анализ.

Ключевые слова: сжиженный природный газ; газотурбинная установка, регазификатор.

В современных условиях глобального перехода к более чистым источникам энергии, использование сжиженного природного газа (СПГ) занимает важное место. СПГ является одним из наиболее экологически чистых видов топлива, обладающим низким уровнем выбросов загрязняющих веществ по сравнению с традиционными углеводородными видами топлива. Однако эффективность использования СПГ в газотурбинных установках (ГТУ) во многом зависит от способа подачи и регазификации СПГ. Цель исследования в данной статье заключается в оценке влияния различных способов подачи СПГ в ГТУ на параметры эффективности их работы.

Описание газотурбинной установки АЛ-31СТ

Газотурбинный привод АЛ-31СТ представляет собой модификацию авиационного двигателя АЛ-31Ф, разработанного для использования в наземных энергетических установках и газоперекачивающих агрегатах. Он используется для привода газоперекачивающих агрегатов на газопроводах и других энергетических установок, где требуется высокая мощность и надежность. АЛ-31СТ отличается высокой топливной эффективностью, длительным ресурсом и устойчивостью к внешним воздействиям. Двигатель оснащен системой автоматического управления, которая обеспечивает оптимальные рабочие параметры в различных режимах эксплуатации. Применение этого привода позволяет значительно повысить производительность и надежность работы энергетических и газотранспортных систем.

Модель с прямой подачей СПГ в камеру сгорания в программе DvigWT

Система DVIGwT предназначена для проведения структурного и параметрического анализа газотурбинных двигателей.

Таблица 1

Исходные данные для термодинамического расчета одновальной ГТУ.

Давление воздуха перед компрессором	$P_н$	101300	Па
Температура воздуха перед компрессором	$T_н$	288	К
Расход воздуха через ГТУ	$G_в$	62,198	кг/с
Температура газа перед турбиной	$T_г$*	1502,03	К
Степень повышения давления КНД	$\pi_к$*кнд	2,979	-
Степень повышения давления КВД	$\pi_к$*квд	5,398	
Адиабатический КПД КНД	$\eta_к$*кнд	0,86	
Адиабатический КПД КВД	$\eta_к$*квд	0,86	
Адиабатический КПД ТНД	$\eta_т$*тнд	0,89	
Адиабатический КПД ТВД	$\eta_т$*твд	0,87	
Коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания	$\sigma_{кс}$	0,94	
Низшая теплотворная способность топлива	Hu	50000	кДж/кг

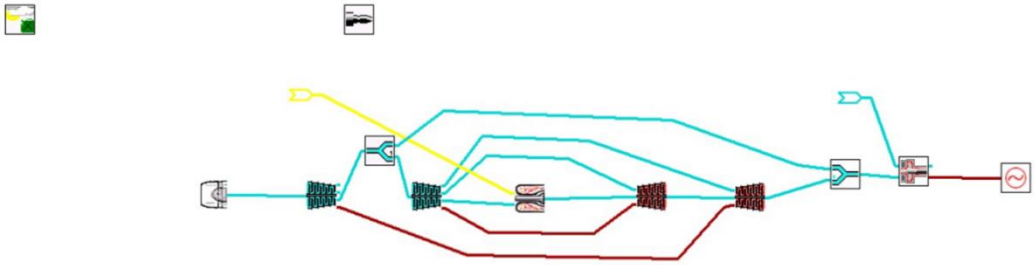


Рис. 1. Расчетная схема для термодинамического расчета АЛ-31СТ

После проведенного расчета получили следующие параметры, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Выходные параметры

Параметр	Значение DVIGwT	Заявленное значение в тех. характеристиках
Абсолютный электрический КПД, %	34,598	35,5
Электрическая мощность установки, кВт	15920	16000
Температура газа на выходе из турбины, К	778,13	790
Давление газа на выходе из турбины, кПа	105,486	106,4
Удельный расход условного топлива на производство эл. энергии, г/(кВт·ч)	355,0375	

Модель с подачей СПГ через регазификатор, стоящий между компрессорами высокого и низкого давления, в программе DvigWT

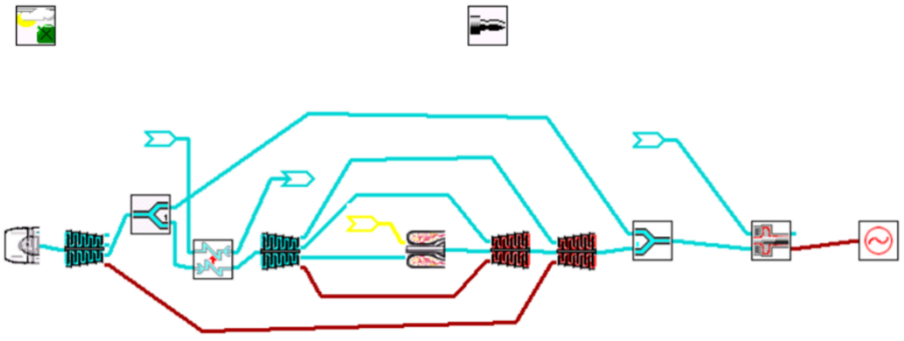


Рис. 2. Расчетная схема для термодинамического расчета ГТУ АЛ-31СТ

После проведенного расчета получили следующие параметры, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Выходные параметры

Параметр	Значение DVIGwT	Заявленное значение в тех. характеристиках
Абсолютный электрический КПД, %	28,026	35,5
Электрическая мощность установки, кВт	15728,96	16000
Температура газа на выходе из турбины, К	738,33	744
Давление газа на выходе из турбины, кПа	105,56	106,4
Удельный расход условного топлива на производство эл. энергии, г/(кВт·ч)	438,289	

Модель с подачей СПГ через регазификатор, стоящий после свободной турбины, в программе DvigWT

Таблица 4

Исходные данные для термодинамического расчета одновальной ГТУ.

Давление воздуха перед компрессором	$P_н$	101300	Па
Температура воздуха перед компрессором	$T_н$	288,15	К
Расход воздуха через ГТУ	$G_в$	62	кг/с
Температура газа перед турбиной	$T_г$*	1502	К
Степень повышения давления КНД	$\pi_к$*кнд	2,979	-
Степень повышения давления КВД	$\pi_к$*квд	5,398	
Адиабатический КПД КНД	$\eta_к$*кнд	0,86	
Адиабатический КПД КВД	$\eta_к$*квд	0,87	
Адиабатический КПД ТНД	$\eta_т$*тнд	0,89	
Адиабатический КПД ТВД	$\eta_т$*твд	0,87	
Коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания	$\sigma_{кс}$	0,94	

Окончание таблицы 4

Низшая теплотворная способность топлива	Hu	50000	кДж/кг

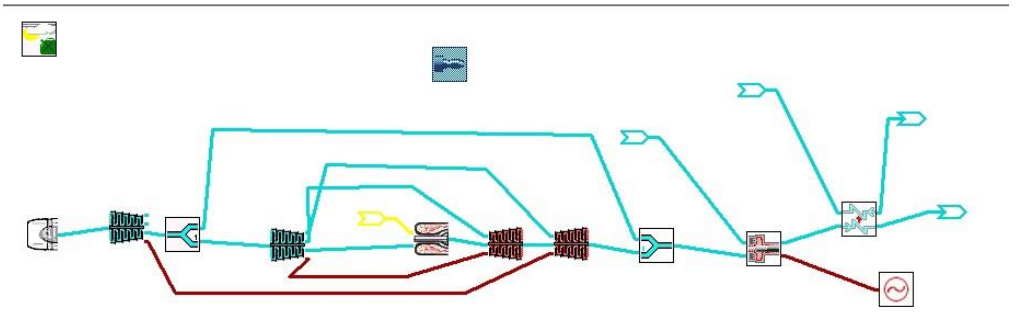


Рис. 3. Расчетная схема для термодинамического расчета ГТУ АЛ-31СТ

После проведенного расчета получили следующие параметры, приведенные в таблице 5.

Таблица 5

Выходные параметры

Параметр	Значение DVIGwT	Заявленное значение в тех. характеристиках
Абсолютный электрический КПД, %	34,28	35,5
Электрическая мощность установки, кВт	15728,96	16000
Температура газа на выходе из турбины, К	732,9	744
Давление газа на выходе из турбины, кПа	105,38	106,4
Удельный расход условного топлива на производство эл. энергии, г/(кВт·ч)	358,301	

Было рассмотрено два варианта подключения регазификатора: между компрессорами высокого и низкого давлений, а также после свободной турбины, где подогрев идет непосредственно выхлопными газами. В первом варианте подключения параметры эффективности ниже, чем во втором за счет того, что, когда регазификатор находится между компрессорами, он работает с газами, не прошедшими все стадии сжатия и нагрева, из-за чего процесс регазификации менее эффективен. В случае, когда регазификатор стоит после свободной турбины и подогревается выхлопными газами, он работает с газами с более высокой температурой, что повышает эффективность теплопередачи.

Исходя из расчетов, подача через регазификатор примерно на 24–38% дороже, чем прямая подача СПГ в камеру сгорания.

Также, исходя из расчетов, видно, что от различного подключения регазификаторной установки зависит расход топлива, что влияет на топливную эффективность. Схема с подключением регазификатора после свободной турбины экономически более выгодна, чем схема с регазификаторной

установкой, стоящей между компрессорами высокого и низкого давлений. Разница достигает 18%.

Затрат на адаптацию ГТУ под подачу СПГ непосредственно в камеру сгорания не требуется, так как камеру сгорания можно заменить на необходимую нам для данной подачи СПГ можно во время капитального ремонта установки, за счет одинаковой стоимости на камеры сгорания. В других рассматриваемых вариантах подачи топлива необходимы дополнительные траты на регазификационную установку, которые составляют около 1 млн рублей.

ГТУ с регазификатором подходит для масштабных проектов с ограниченным объемом спроса на мощность, также если есть площадка для установки газопроводов и ограничения по хранению и транспортировке СПГ

ГТУ с подачей СПГ в камеру сгорания подходит для объектов, где необходима высокая мощность, в удаленных районах, где не так развита газотранспортная инфраструктура и желательно избегать установок регазификаторов из-за ограниченной площадки.

Библиографический список

1. Анализ социально-экологического эффекта использования сжиженного природного газа для выработки электрической энергии в отдаленных регионах [Электронный источник] Режим доступа: https://na-journal.ru/4-2023-ekologiya/4843-analiz-socialno-ekologicheskogo-effekta-ispolzovaniya-sjijennogo-prirodnogo-gaza-dlya-vyrabotki-elektricheskoi-energii-v-otdalennyh-regionah Дата обращения: 28.09.2024.

2. Горюнов И.М., Салимянов С.И. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Теория и расчет ГТУ» – Уфа: Уфимск. авиац. техн. ун-т – 2010.

3. ОДК УМПО АЛ-31СТ [Электронный источник] Режим доступа: https://umpo.ru/products/gazoturbinnaya-energetika/al-31st / Дата обращения: 30.05.2024.

4. Способы регазификации сжиженного природного газа [Электронный источник] Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-regazifikatsii-szhizhennogo-prirodnogo-gaza/viewer Дата обращения: 28.05.2024.

© Томина Д.А., 2024

УДК 533.666.2

А.В. МЕНЬШИКОВ
Serfen222@gmail.com
Науч. руковод. – Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

РАКЕТА НА БАЗЕ H500-LW ДЛЯ СОРЕВНОВАНИЙ ВИШ25. ОПТИМИЗАЦИЯ И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация: в настоящей работе приведены принцип создания ракеты в рамках положения всероссийского чемпионата воздушно-инженерной школы на 2024

год, пути оптимизации и обоснование конструкции, а также теоретические расчеты и моделирование полёта.

Ключевые слова: ракетостроение; ракетные двигатели; аэродинамика; моделирование; OpenRocket; 3D-печать; оптимизация; система спасения.

В работе рассматривается создание и оптимизация модели ракеты в рамках ВИШ25. Была проведена работа с аналитикой, почему конструкция была оптимизирована с целью обеспечения максимальной эффективности.

Выбор двигателя

Проведены были сравнительные исследования, исходя из чего подобран двигатель:

Таблица 1

Виды двигателей

Производитель	Обозначение	Суммарный импульс	Диаметр, мм	Длинна, мм
AeroTech	HPH45W	322	38	203
AeroTech	I180W	326	38	191
AeroTech	H170M	318	38	191
AeroTech	HP-H550ST	313	38	206
Loki Research	H500-LW	320	38	295

Была сделана выборка двигателей среди доступных и подходящих под условия ВИШ25, которая вылилась в Таблица 1. В ракете будет H500-LW, его длинна более чем нам подходит.

Моделирование ракеты

Дальнейшая конструкция ракеты будет спроектирована с учетом требований соревнований ВИШ25 на Лигу «Старший ГИРД».

Разработка ракеты начинается с этапа проектирования в специализированно программе OpenRocket. Подобраны были размеры обтекателя, корпусной трубы, стабилизаторов и остальных частей ракеты, так же общую компоновку. При разработке учитывалась стабильность полета, центр давления, аэродинамика ракеты, достижение апогеи полета.

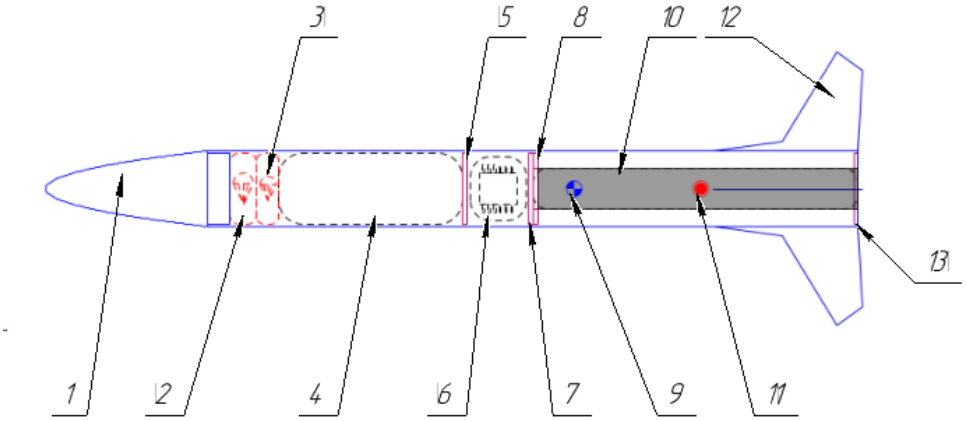


Рис. 1. Схема ракеты сделанная в OpenRocket
1 – Обтекатель; 2 – Парашют для корпуса ракеты; 3 – Парашют для полезного груза; 4 – Полезный груз; 5,7 – Переборка; 6 – Бортовой компьютер; 8,13 – Центрирующие кольцо; 9 – Центр тяжести; 10 – Двигатель; 11 – Центр давления; 12 – Стабилизаторы.

Для оптимизации необходимо учитывать следящие факторы:

- Аэродинамика – оптимизация формы обтекателя и стабилизаторов для снижения аэродинамического сопротивления и повышения стабильности полета
- Масса деталей – влияет на общую массу ракеты, соответственно лучше использовать более легкие материалы для изготовления деталей. Поэтому воспользуемся 3D принтером.
- Надежность – выбор проверенных методов и способов изготовления, а также качественных материалов.
- Прочность – свойство материала сопротивляться разрушению.
- Центр тяжести Рис. 1 – это точка, через которую проходит равнодействующая всех сил тяжести
- Центр давления Рис. 1 – точка тела, в которой пересекаются линия действия равнодействующей сил давления на тело окружающей среды и некоторая плоскость, проведённая в теле.

Уменьшает аэродинамическое сопротивление, а также улучшает стабильность ракеты в целом.

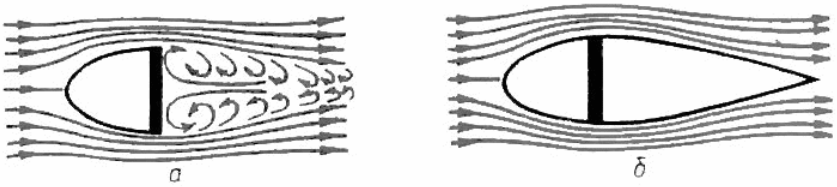


Рис. 2. Пример обтекаемости «без диаметрального перехода/с диаметральным переходом

Степенной обтекатель с параметром формы 0.5 подходит лучше всего. Форма стабилизатора была разработана подбором от показателя стабильности ракеты, и также сам стабилизатор был сделан согласно исследованиям. Так к примеру Рис. 2 у обтекателя с диаметральным переходом будет выше аэродинамика, в нашем случаи переход-корпус.

В конструкции ракеты 4 стабилизатора Рис. 1. Они улучшают аэродинамику ракеты.

Система спасения

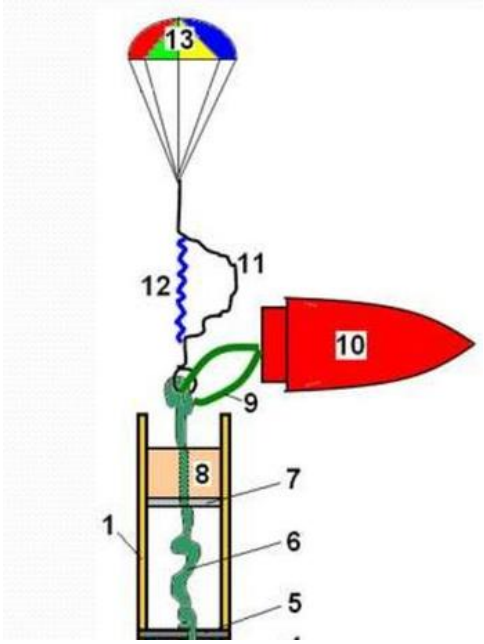


Рис. 3. Система спасения ракеты “Циклон-2М”

Систему спасения можно поделить условно на составляющие части: парашют, стропы, катапульта, примером может послужить система “Циклон-2М” Рис. 3.

Катапульта Рис. 1 вставляется в корпус до платформы к которой прикреплен сервопривод SG90. Последи в свою очередь фиксирует первое до момента выбивания обтекателя и выброса полезного груза Рис. 1 с парашютами, то есть до подачи бортовым компьютером сигнала после достижения апогея. Стропы одного парашюта Рис. 1 крепятся к корпусу ракеты, другого Рис. 1 к полезному грузу. Расчет первого парашюта и его строп был произведен благодаря OpenRocket Рис. 5 и Рис. 6, для второго аналогичным образом Рис. 7 и Рис. 8. Сами Расчеты были получены исходя из различных углов атаки возможных воздушных, почему были в последствии получены Рис. 5–8 с учетом оптимизации.

Параметр	Текущее	Минимум	Максимум
Парашют: Высота срабатывания	144 m	100 m	400 m
Парашют: Диаметр	37,7 cm	15 cm	60 cm
Парашют: Задержка срабатывания	0 s	0 s	10 s
Парашют: Коэффициент аэродинамич...	1,4	0,4	1,6
Парашют: Положение	58,2 cm	0 cm	60 cm

Рис. 5. Параметры парашюта для корпуса ракеты

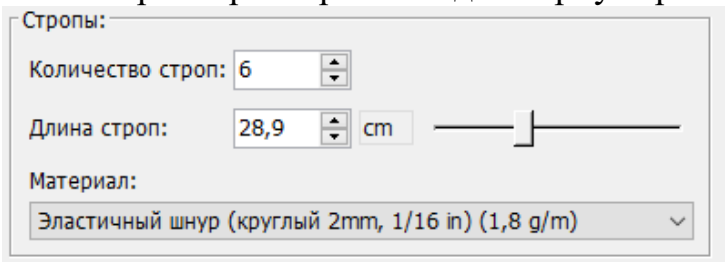


Рис. 6. Параметры для строп парашюта корпуса

Параметр	Текущее	Минимум	Максимум
Парашют: Высота срабатывания	219 m	100 m	400 m
Парашют: Диаметр	37,7 cm	15 cm	60 cm
Парашют: Задержка срабатывания	0 s	0 s	10 s
Парашют: Коэффициент аэродинамич...	0,838	0,4	1,6
Парашют: Положение	57 cm	0 cm	60 cm

Рис. 7. Параметры парашюта для груза

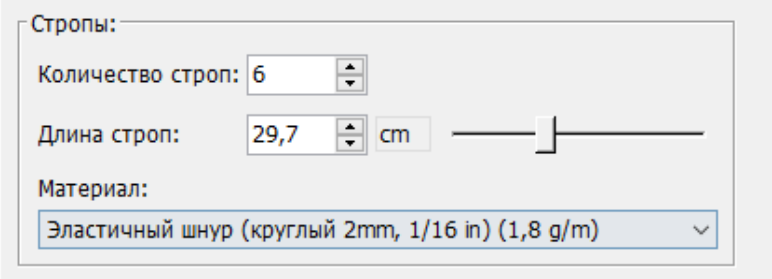


Рис. 8. Параметры строп для парашюта полезного груза

Были проведены расчеты Рис. 9 траектории полета и моделирование ее поведения в воздухе. Расчеты и моделирование позволили определить скорость полета, ускорение, боковую дистанцию отклонения, точку апогея. Результаты расчетов и моделирования были использованы для корректировки форм обтекателя и стабилизатора, снижения общей массы.

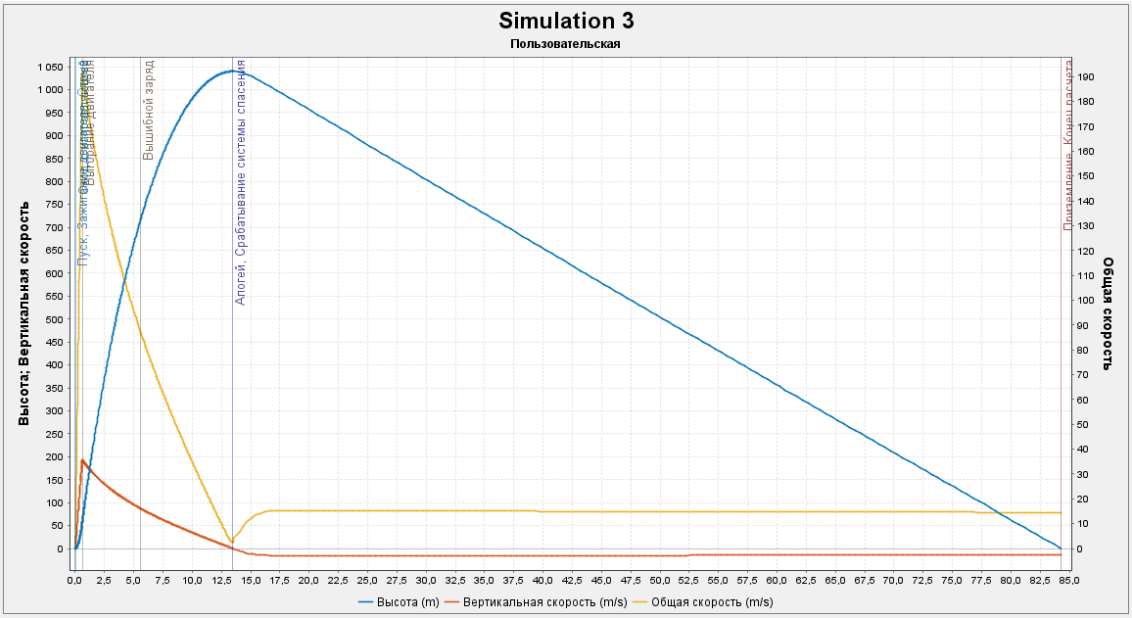


Рис. 9. График симуляции полета ракеты

Для изготовления корпуса ракеты была выбрана труба, изготовленная из нескольких слоев бумаги, ввиду своей доступности, дешевизны, прочности и простоты в дальнейшей сборке.

Элементы бортового компьютера Рис. 1: nrf24L01 радио модуль, CD card reader модуль cd карты, Mpu6050 модуль акселерометра и гироскопа, зумер.

Общая сборка

В конечном счете после проведения расчетов и анализа ракета должна обладать достаточной стабильностью, минимально допустимой массой и обеспечить максимальное достижение высоты.

После проведения всех расчётов и анализа были смоделированы части ракеты подлежащие печати на 3D принтере. Использовался PLA-пластик при изготовлении деталей. Подобная технология позволяет получить детали, обладающие сложной геометрией, с высокой точностью изготовления. Однако присутствуют и недостатки: скорость печати, шанс получения брака при печати, из-за чего приходится перепечатывать детали, соответственно данный фактор влияет на время производства деталей.

Полученные данные в ходе процесса сборки и проектирования, а также измерения Таблица 2

Таблица 2

Данные ракеты	Численное значение
Масса ракеты с двигателем, грамм	1652
Масса ракеты без двигателя, грамм	1198
Диаметр, мм	70
Длинна, мм	754

Заключение

Ракета была оптимизирована благодаря полученным расчетам OpenRocket и теоретическим материалам. Познания в Аэродинамике позволили улучшить показатели ракеты в несколько раз.

Были проведены тесты системы спасения, посредством сброса полезного груза и ракеты по отдельности с 5 этажа. Груз с корпусом не были повреждены при посадке. Запуск ракеты не производился.

Библиографический список

9. О моделировании ракет // URL: https://dzen.ru/a/YHWnhPRZ7y15bcf1
10. Зоншайн С.И. Аэродинамика и конструкция летательных аппаратов: Учебник для несамолетных специальностей авиационных вузов. – М.: Высш. шк., 1968. – 364 с.
11. Система спасения ракеты «Циклон-2М» // URL: https://kia-soft.narod.ru/interests/rockets/cyclone2m/safety/safety.htm

© Меньшиков А.В., 2024

СЕКЦИЯ 1.4. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

УДК 621.313

А.Р. ТИНИКОВ, Б.И. АСАДУЛЛИН
arslantinikov@yandex.ru
Науч. рук – докт. техн. наук Р.Д. ЕНИКЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

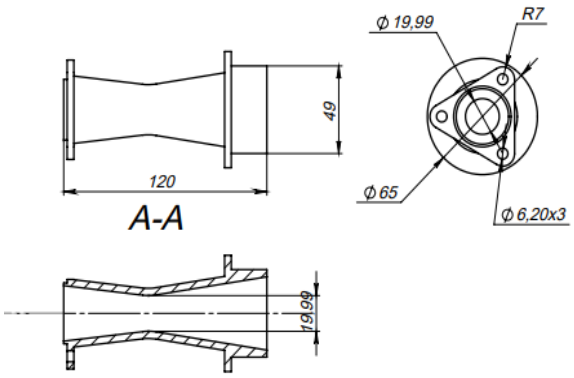
РАСЧЁТ РЕСТРИКТОРНОЙ ШАЙБЫ ДЛЯ БОЛИДА КЛАССА «FORMULA STUDENT»

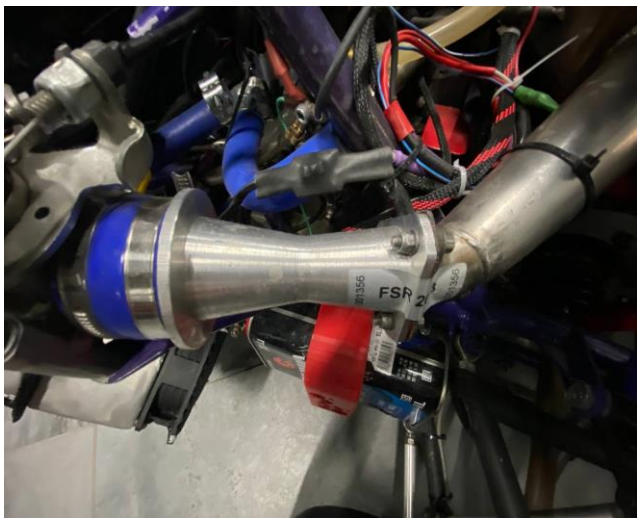
Аннотация: статья посвящена использованию и расчёту рестрикторной шайбы в болиде класса «Formula Student». Рестрикторная шайба представляет собой устройство, ограничивающее поток воздуха через впускную систему двигателя, тем самым снижая мощность мотора для соблюдения правил соревнований. В статье рассматриваются принципы работы рестриктора, его влияние на характеристики двигателя, а также особенности применения этого устройства в различных видах автоспорта и мотокросса. Особое внимание уделено техническим аспектам установки и настройки рестрикторов, а также их влиянию на эксплуатационные параметры автомобилей и мотоциклов. *Ключевые слова:* болид «Formula Student», автомобиль, автоспорт, мотоспорт, гонки.

Современные автомобильные и мотоциклетные гонки – это зрелищный спорт, который привлекает миллионы зрителей по всему миру. Однако, помимо развлекательной составляющей, автогонки представляют собой сложный технический процесс, требующий строгого соблюдения правил и норм безопасности. Одним из ключевых элементов управления параметрами двигателя в гоночных автомобилях и мотоциклах является рестрикторная шайба. Этот элемент играет важную роль в обеспечении равных условий для всех участников соревнований, а также в повышении уровня безопасности на трассе.

Рестриктором называется устройство, предназначенное для ограничения подачи воздуха или топлива в двигатель внутреннего сгорания. В контексте автоспорта и мотокросса чаще всего используется рестрикторная шайба – металлическая пластина с центральным отверстием определенного диаметра. Эта шайба устанавливается в системе впуска двигателя между воздушным фильтром и самим двигателем. Ее основное назначение заключается в снижении количества воздуха, проходящего через систему впуска, что, в свою очередь, ведет к уменьшению мощности двигателя.

Диаметр отверстия в рестриктивной шайбе определяет степень ограничения воздушного потока. Чем меньше диаметр отверстия, тем сильнее ограничивается подача воздуха и, соответственно, уменьшается мощность двигателя. Это позволяет организаторам соревнований контролировать





производительность двигателей разных типов и классов, делая гонки более справедливыми и безопасными.

Рис. 1. Рестриктивная шайба

Идея использования рестрикторов возникла еще в начале XX века, когда автопроизводители начали активно участвовать в гонках, стремясь продемонстрировать превосходство своих машин над конкурентами. Первые рестрикторы представляли собой простые механические устройства, устанавливаемые непосредственно перед карбюратором или инжектором. Эти устройства позволяли ограничить подачу топлива, снижая тем самым мощность двигателя. Со временем технологии совершенствовались, и рестректорные системы стали более сложными и эффективными. Современные рестритекторы включают в себя различные типы устройств, таких как рестрирктурные шайбы, дроссельные заслонки и даже электронные системы управления подачей топлива.

Работа рестрической шайбы основана на принципе аэродинамического сопротивления. Когда воздух проходит через узкое отверстие в шайбе, он сталкивается с препятствием, что вызывает снижение давления и уменьшение объема воздуха, поступающего в двигатель. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению количества топливно-воздушной смеси, подаваемой в цилиндры двигателя, и, следовательно, к снижению мощности. Для обеспечения оптимального баланса между мощностью и безопасностью, надо провести газодинамический счет рестриктора, данный расчёт будет проводиться с помощью программы ALLBEA и SOLIDWORKS.

В автоспортивных дисциплинах, таких как Формула-1, NASCAR, WRC и другие, рестрикторные шайбы играют ключевую роль в регулировании

производительности двигателей. Например, в Формуле-1 начиная с сезона 2014 года были введены новые правила, согласно которым двигатели должны быть оснащены рестрикторными шайбами диаметром 6 мм. Это позволило значительно уменьшить мощность двигателей, сделав гонки более безопасными и интересными для зрителей.

Рестрикторные шайбы являются важным элементом в автоспорте и мотокроссе, обеспечивая безопасность участников и уравнивая их шансы на успех. Несмотря на некоторые недостатки, они остаются одним из самых эффективных способов регулирования мощности двигателей и контроля за техническими характеристиками транспортных средств.

Библиографический список

1. Орлов А.В. «Рестрикторы в мотоспортивной технике». Екатеринбург: Уральская техническая школа, 1989.
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. «Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений». 2008.

© Тиников А.Р., Асадуллин Б.И., 2024

УДК 621.43.06

В.О. АХУНОВ
akhunov_vladislav@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Р.Ю. САКУЛИН

Уфимский университет науки и технологий

СИСТЕМА EGR

Аннотация: создание системы для снижения токсичности отработавших газов для автомобиля LADA Granta. Объектом моделирования является клапан EGR. Моделирование проводилось с помощью программы Solid Works. Приведена 3D модель клапана и схема системы рециркуляции отработавших газов ДВС. Доказана возможность снижения возможность снижения токсичности отработавших газов, выпускаемых двигателем газов. Смоделирован и расположен клапан EGR с учетом конструктивных особенностей выпускного коллектора.
Ключевые слова: система EGR, снижение токсичности, рециркуляция отработавших газов, модель клапана, безопасность и экологичность системы.

Система рециркуляции отработанных газов *(EGR)* является эффективным способом снижения выбросов вредных веществ при сгорании топлива. Однако,

для ее эффективной работы необходимо регулярное обслуживание и очистка отложений, а также следить за уровнем масла, чтобы избежать повышенного расхода. В целом, система *EGR* является важным элементом экономии топлива и снижения вредных выбросов, но требует своевременного ухода и обслуживания.

Система рециркуляции ОГ создана для снижения токсичности (оксидов азота) ОГ на режимах прогрева и резкого ускорения. Суть системы заключается в том, что поступает возвращение строго определенного количества газов во впуск. Сама система не работает на холодном двигателе и прогреве до 40 °С, и на оборотах холостого хода.

Бывает несколько типов системы рециркуляции: с электрическим, с пневматическим и электропневматическим клапаном. В данной работе рассматривается именно электропневматический клапан.

К плюсам системы рециркуляции можно отнести следующее: уменьшение насосных потерь на впуске; уменьшение процентного содержания кислорода в камера сгорания; максимальной температуры горения и далее, уменьшение количества оксидов азота; положительная динамика экономических показателей работы двигателя на некоторых режимах.

Минусами данной системы является: увеличение времени процессов сгорания; колоссальное увеличении выбросов СН при достижении определенного уровня рециркулируемых ОГ; большой расход топлива при больших значениях рециркуляции.

Система рециркуляции предполагает определенный оптимальный интервал работы от 15…20% можно наблюдать уменьшение выбросов, когда степень регуляции более 10% можно фиксировать ухудшение экономичности двигателя, критическое увеличение выбросов СН фиксируется при увеличении доли перепущенных ОГ более 20%.

В нашей стране данная тема является немного «специфичной». Почему, во-первых, качество топлива оставляет желать лучшего, несмотря на популярные заправки с большим именем можно нарваться на контрафакт. Во-вторых, есть мнение, что система EGR не дает работать двигателю на полную мощность. Поэтому многие эту систему «глушат» путем снятия самого клапана и перепрошивки ЭБУ.

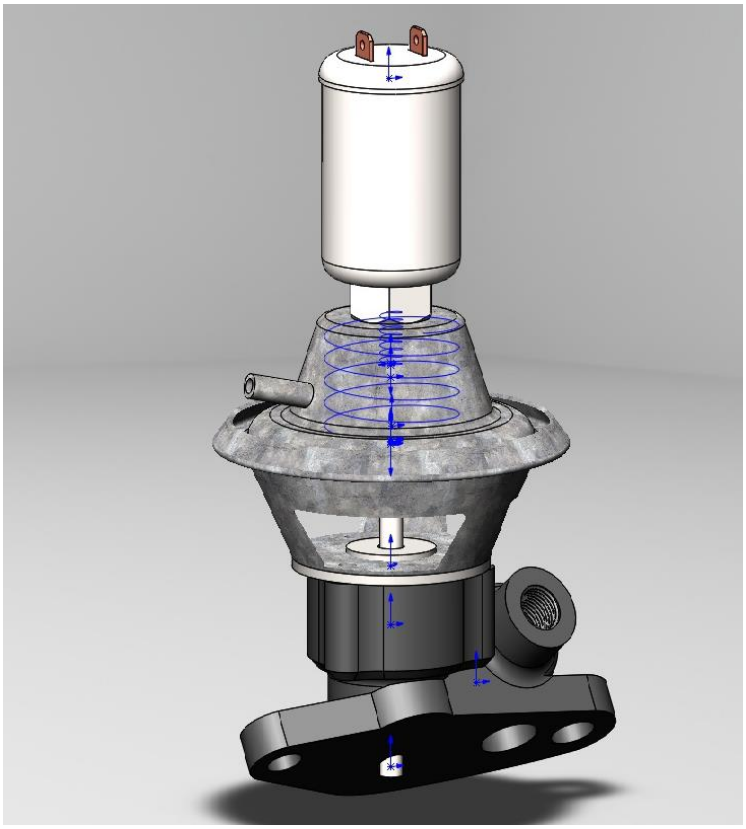


Рис. 1. 3D модель клапана EGR

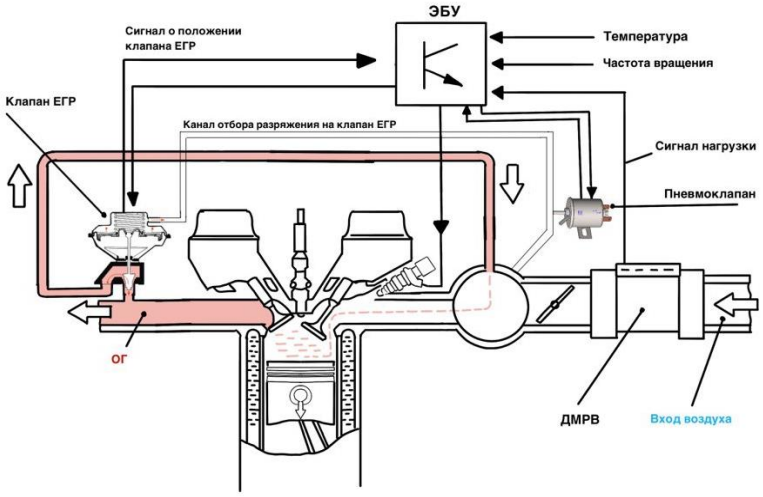


Рис. 2. Схема работы системы рециркуляции отработавших газов

Принцип работы системы заключается в том, что в процессе монтажа системы на ДВС, управление происходит от ЭБУ. Путем программы для настройки блока управления вносятся данные о: системе рециркуляции ОГ, температуре ОГ.

Подача ОГ происходит через клапан EGR, который является основным элементом всей системы рециркуляции ОГ. Клапан открывается только в

случае необходимости, и закрывается, когда газы уже в нужном количестве поступили во впускной коллектор.

Рассчитаем расход воздуха G через двигатель. Плотность воздуха равна 1,2 кг/м^3, объем двигателя 1596 см^3. Отсюда вычисляем:

$$G = 1{,}2 \times 1596 \times 3800 \times 85/(2 \times 1000000 \times 100) = 0{,}0554 \text{ кг/с}$$

(3.1.1)

Плотность воздуха ρ_0 в окружающей среде:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{RT_0}, \quad (1)$$

где R – газовая постоянная (для воздуха – 287 Дж/(кг·град));

p_0 - атмосферное давление равное 0,1 МПа;

T_0 – температура окружающей среды равная 302К.

$$\rho_0 = \frac{100 \times 10^3}{287 \times 302} = 1{,}2 \text{ кг/м}^3.$$

Давление p во впускном патрубке двигателя:

$$p_1 = p_0 - \rho_{вод} g H, \quad (2)$$

где $\rho_{вод}$ – плотность воды;

g – ускорение свободного падения.

$$p_1 = 1{,}2 - 1000 \times 9{,}8 \times 0{,}085 = 99167 \text{ Па}.$$

Скорость воздуха во впускном патрубке двигателя:

$$u_1 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}\frac{p_0}{\rho_0}\left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}, \quad (3)$$

где $\gamma = 1{,}4$ – показатель адиабаты воздуха;

$$u_1 = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}4}{1{,}4 - 1} \times \frac{100000}{1{,}2}\left[1 - \left(\frac{99167}{100000}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}\right]} = 57{,}7 \text{м/с}.$$

Плотность воздуха во впускном патрубке двигателя определяется из уравнения адиабаты:

$$\rho_1 = \rho_0 \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{1/\gamma}, \quad (4)$$

$$\rho_1 = 1{,}2 \left(\frac{99167}{100 \times 10^3}\right)^{1/1{,}4} = 1{,}19 \text{ кг/м}^3.$$

Расход воздуха $G_К$ через двигатель:

$$G_к = \rho_1 u_1 F_1, \quad (5)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения впускного патрубка двигателя в месте измерения разрежения. Следовательно,

$$F = \frac{G}{\rho_1 \times u_1}; \quad (6)$$

$$F = \frac{0,0554}{(1,19 \times 57,7)} = 0,00081 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, диаметр проходного сечения равен 32мм. Что примерно соответствует диаметру впускного канала автомобиля *LADA GRANTA* (34мм).

Учитывая, что коэффициент рециркуляции отработавших газов составляет 20%, получаем необходимую площадь сечения канала клапана EGR равное:

$$908 \times 0,2 = 182 \text{ мм}, \quad (7)$$

отсюда следует, что диаметр сечения клапана d равен

$$d = \sqrt{((182 \times 4)/\pi)} = 15 \text{ мм}, \quad (8)$$

а схожими размерами каналов является клапан рециркуляции отработавших газов от автомобиля ВАЗ Нива. У которого диаметр сечения равен 13 мм.

Система рециркуляции ОГ несет не только экологический смысл, но и подразумевает собой систему управления двигателем. То есть при движении на передаче или торможении двигателем, дроссельную заслонку можно не перекрывать полностью, а добиться снижения мощности путем перепускания большего количества ОГ во впускной тракт, что позволяет снизить насосные потери за счет перепуска недогоревшей смеси по кругу.

Также реализовать эту схему практически на любом режиме движения, при небольшом отпускании газа, не прикрывать дроссельную заслонку, а просто добавлять процент отработавших газов во впуск.

Учитывались конструктивные особенности выпускного коллектора для расположения на нем клапана. В ходе работы выяснили что:

- система рециркуляции отработавших газов будет эффективно работать снижать выбросы токсичных веществ в атмосферу;
- использование систем рециркуляции является востребованным в будущем при разработке ДВС, для улучшения его рабочих процессов и экологических параметров.

Таким образом, была спроектирована система для снижения токсичности отработавших газов для автомобиля LADA Granta.

Библиографический список

1. Колчин А.Н., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. Пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 400 с.

2. Морозов В.А., Морозова О.Н. Совершенствование эффективности и экологичности двигателей внутреннего сгорания // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1.

3. Ерохов В.И. Система рециркуляции отработавших газов современных двигателей // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 4 (34). – С. 36–42.

4. Ахромешин А.В. Применение системы рециркуляции отработавших газов в ДВС с управляемым газообменом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – №1) – С. 235-239.

5. Игнатенко Р.А. Экологические проблемы двигателей внутреннего сгорания и пути их решения // Allbest.ru, – 2004.

6. Гарипов, М.Д. Конструкция энергомашин [Электронный ресурс] / М.Д. Гарипов, Р.Ю. Сакулин. Учебное электронное издание. Уфа: УГАТУ, 2012. – 149 с.

7. Борисов, А.О. Перспективные методы управления двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс] / А.О. Борисов, Р.Д. Еникеев; учебное пособие для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлению 140500 «Энергомашиностроение. Уфа: УГАТУ, 2011.

© Ахунов В.О., 2024

УДК 621.43.056

Д.Ф. ИДРИСОВ
dinaridrisov30@yandex.ru
Науч. руководов. – ст. преподаватель М.Д. ГАРИПОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА АВИАЦИОННОМ КЕРОСИНЕ

Аннотация: в данной статье рассмотрен процесс моделирования двухтактного двигателя, работающего на авиационном керосине. Проведено исследование процессов сгорания топлива, теплообмена и динамики газовых потоков. *Ключевые слова:* моделирование; двухтактный двигатель, авиационный керосин.

Двухтактные двигатели находят широкое применение в малой авиации благодаря их простоте, легкости и высоким удельным показателям мощности. Использование авиационного керосина в таких двигателях представляет значительный интерес, оно более безопасно в обращении в местах, повышенных опасности.

Из-за низкой испаряемости авиационного керосина возникают сложности с формированием воспламеняемой смеси в районе искрового промежутка, в результате чего к данным системам предъявляются высокие требования по организации качественного распыливания и организации процесса сгорания.

Для решения этих проблем необходимо провести моделирование рабочего процесса двигателя на керосине. Для этого целью данной работы является создание методики моделирования рабочего процесса двухтактного двигателя на керосине.

Геометрия цилиндра, движения поршня и каналов была разработана в системе автоматизированного проектирования (например, SolidWorks).

Объектом исследования в данной работе выбран двухтактный двигатель внутреннего сгорания NGH-35GT, имеющего мощность 4 л.с. Технические характеристики данного двигателя приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики двухтактного двигателя «NGH-35GT»

Характеристика	Значение
Рабочий объём	34.96 $см^3$
Ход поршня	32 мм

На рис. 1 изображен двухтактный двигатель с системой пневматического впрыска авиационного керосина.

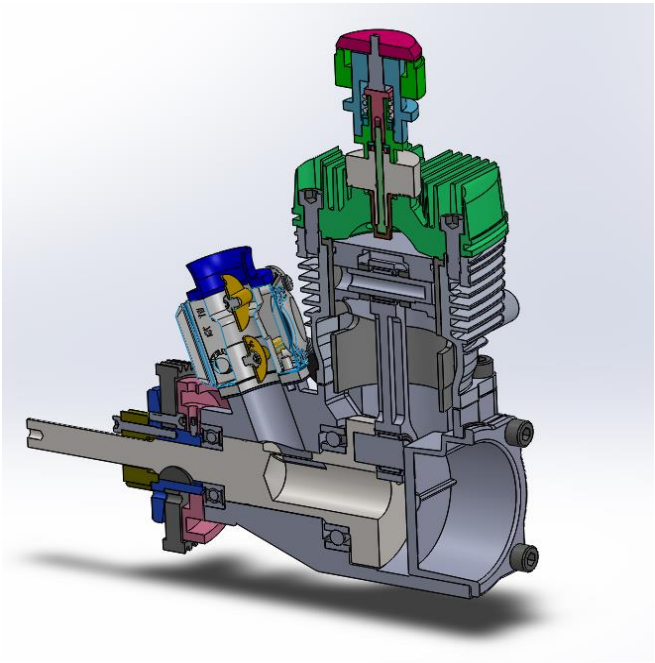


Рис. 6. Модель двухтактного двигателя в разрезе

Для моделирования горения авиационного керосина и детонации керосина необходимы сложные химические реакции, которые обычно содержат сотни или тысячи компонентов. Так как разные компоненты реагируют с разной скоростью, интегрирующие стадии реакции требуют больших

вычислительных затрат. Для моделирования горения авиационного керосина методом вычислительной гидродинамики (CFD) необходимо использовать простейший кинематический механизм, наиболее точно описывающий детонацию. Программное обеспечение, такое как Simcenter STAR-CCM+ In-cylinder позволяет моделировать различные типы двухтактных двигателей. Использование данной программы позволяет упростить процесс моделирование рабочего процесса двигателя, поскольку процесс уже встроен в приложение STAR-CCM.

На рис. 2 изображена трехмерная твердотельная модель двухтактного двигателя для моделирования рабочего процесса.

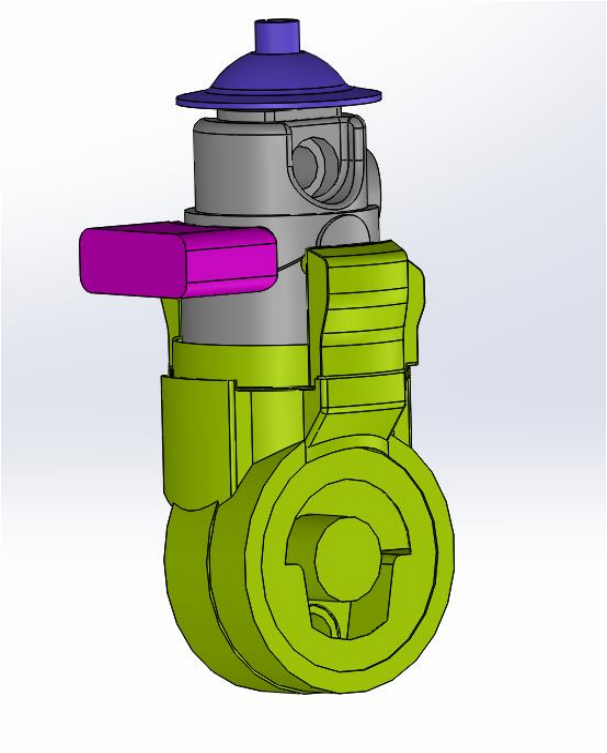


Рис. 7. Трехмерная твердотельная модель

По результате расчета была получена кривая давления без моделирования горения. На рис. 3 кривая давления без учета моделирования горения.

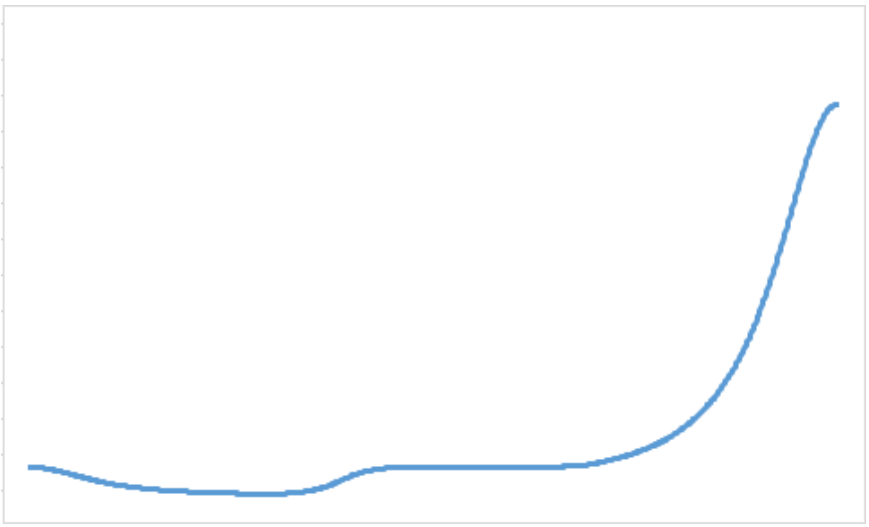


Рис. 8. Кривая давления при обороте 360 градусов.

Библиографический список

1. М.Д. Гарипов, Р.Ф. Зиннатуллин, А.А. Мелков, В.А. Шаяхметов, Э.М. Халилов, Р.Ю. Сакулин. Статья: Экспериментальное исследование возможности бездетонационного сгорания авиационного керосина в четырехтактном двигателе с искровым воспламенением – Уфа, УУНиТ, 2024.

© Идрисов Д.Ф., 2024

УДК 621.1.018

И.У. ИЛЬБАКТИН, Н.И. САЛАТОВ
ideluralovich@gmail.com, nikolayi0606@mail.ru
Науч. руководов. – д. техн. наук, проф. Р.Д. ЕНИКЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ YAMAHA XJ6N ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ ТУРБОНАДДУВА

Аннотация: в статье рассматривается возможность повышения характеристик двигателя Yamaha XJ6N за счет внедрения турбонаддува. Выполнены расчеты степени повышения давления воздуха с учетом охлаждения в интеркулере, обоснована эффективность снижения номинальных оборотов двигателя без потери мощности и момента. Предложены дальнейшие шаги для реализации модификации.
Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, наддув, турбонаддув, турбокомпрессор, коэффициент полезного действия, мощность, беспилотный транспорт.

Международные инженерно-спортивные соревнования Formula Student – это образовательный проект, основанный Сообществом автомобильных инженеров (SAE). Цель проекта – формирование инженерного мышления у студентов и воспитание специалистов, готовых к решению творческих задач. Это достигается путем проведения ежегодных соревнований на спортивных прототипах (гоночных болидах), построенных за 1 календарный год командой студентов согласно официальному техническому регламенту. В ходе соревнования проводится 3 статические дисциплины: Защита конструкции, Защита производства, Защита бизнес-плана – и 5 динамических дисциплин: Ускорение по прямой 75 м, Скидпад (восьмёрка), Автокросс 1 км, Гонка на выносливость 22 км, Топливная эффективность.

Соревнования Formula Student предъявляют высокие требования к эффективности, надежности и топливной экономичности силовых установок гоночных болидов. К тому же двигатели внутреннего сгорания (ДВС) имеют множество ограничений согласно техническому регламенту соревнований, что сказывается в достижении большей мощности и крутящего момента, особенно значительными являются ограничение рабочего объема и физическое ограничение сечения во впускной системе ДВС путем установления рестриктора (шайбы).

На данный момент в гоночном болиде инженерно-гоночной команды UGATU Racing Team используется атмосферный ДВС от спортивного мотоцикла Yamaha XJ6N, пришедший в гражданскую модель с гоночного прототипа. По своей специфике данный ДВС высокооборотный и имеет следующие пиковые характеристики – максимальный момент 59,7 Н*м при 8000 об/мин и максимальную мощность 57 кВт при 10000 об/мин, при режиме ограничения ДВС в 11000 об/мин. Из-за такой характеристики ДВС для получения лучших динамических характеристики гоночного болида пилоту приходится постоянно держать мотор на высоких оборотах, где двигатель потребляет больше топлива, повышая теплонапряженность и заведомо уменьшая шансы на победу в дисциплине «Топливная эффективность». К тому же на режиме максимальной мощности пилот легко упирается в ограничение по оборотам двигателя, из-за чего ему приходится часто переключать скорости на КПП, теряя время в кольцевом заезде. Таким образом, возникает потребность в перемещении режима максимальных момента и мощности двигателя на более низкие обороты, при этом сохранив или улучшив характеристики и топливную эффективность ДВС.

Данная задача может быть решена путем установления системы наддува на ДВС. Различают несколько типов наддува:

– Постоянный механический наддув. Работает за счёт компрессора, приводящегося в движение от коленчатого вала ДВС.

– Газотурбинный наддув. Работает за счёт привода потоком отработавших газов турбины, вращающей компрессор, который нагнетает больше воздуха в цилиндры ДВС.

– Резонансный наддув. Для работы используется нестационарные газодинамические эффекты в газовоздушном тракте (ГВТ) ДВС.

Каждый из типов наддува имеет свои достоинства и недостатки. Для проработки решения поставленной задачи был выбран газотурбинный наддув. Турбонаддув, как технология повышения эффективности ДВС, позволяет компенсировать вышеупомянутые ограничения во впускной системе, улучшая характеристики двигателя без существенного увеличения его массы и габаритов. При этом данный тип наддува является наиболее эффективным с точки зрения коэффициента полезного действия (КПД), так как использует энергию отработавших газов, которые в других случаях не используются и просто выводятся в окружающую среду. Однако у системы турбонаддува есть и недостатки: задержка отклика (турбо-лаг), высокая теплонапряженность самой системы и связанных узлов, уменьшение плотности наддувочного воздуха. Для нивелирования влияния недостатков турбонаддува на работоспособность и надежность систем ДВС необходимо правильно подобрать и сопоставить режимы работы лопаточной машины турбокомпрессора и поршневой машины ДВС, также охлаждать наддувочный воздух и сам турбокомпрессор.

Убедимся теоретически в возможности выполнения поставленной задачи путем внедрения системы турбонаддува с системой охлаждения наддувочного воздуха путем расчета степени повышения давления свежего заряда π_k. Для этого рассчитаем параметры рабочих циклов ДВС до модификации и ДВС с системой турбонаддува.

Таблица 1.

Характеристики двигателя Yamaha XJ6N

Тип двигателя, i и τ	4-цилиндровый, 4-тактный, рядный
Рабочий объем цилиндра V_h	150 см³
Диаметр цилиндра D	65,5 мм
Ход поршня S	44,5 мм
Степень сжатия ε	12,2
Система газораспределения	DOHC, 4 клапана на цилиндр
Система подачи топлива	Инжекторная, 4 х 32 мм
Тип топлива	Бензин АИ-98, $H_u = 46 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
Максимальная мощность N_e	77,5 л.с. (57 кВт) при 10000 об/мин
Максимальный крутящий момент M_e	59,7 Н*м (6,1 кг*м) при 8000 об/мин

Первоначально произведем расчет параметров рабочего цикла ДВС без модификаций при номинальном режиме работы $n = 10000$ об/мин:

Среднее эффективное давление

$$p_e = {30N_e\tau}/{iV_h n} = 1900 \text{ кПа}$$

Средняя скорость поршня

$$\vartheta_{\text{п.ср}} = {Sn}/{30} = 14{,}667 \text{ м/с}$$

Среднее давление механических потерь по модели Чена-Флинна

$$p_\text{м} = (p_\text{м})_0 + Ap_{z\,max} + B\vartheta_{\text{п.ср}} + C{\vartheta_{\text{п.ср}}}^2 = 241863{,}9 \text{ Мпа}$$

где $(p_\text{м})_0 = 40$ кПа; $p_{z\,max} = 10{,}1$ МПа; $A = 0{,}005; B = 9000\ \frac{\text{Па}}{\text{м/с}}$;

$$C = 90\ \frac{\text{Па}}{(\text{м/с})^2}$$

Мощность механических потерь

$$N_\text{м} = \frac{p_\text{м} iV_h n}{30\tau} = 12093{,}2 \text{ Вт}$$

Средняя индикаторная мощность

$$N_i = N_\text{м} + N_e = 69093{,}2 \text{ Вт}$$

КПД механический

$$\eta_\text{м} = 1 - \frac{N_\text{м}}{N_i} = 0{,}825$$

Среднее индикаторное давление

$$p_e = \frac{30N_i\tau}{iV_h n} = 1381{,}86 \text{ кПа}$$

Удельный эффективный расход примем за $g_e = 300\ \frac{\text{г}}{\text{кВт*ч}}$

Эффективный КПД

$$\eta_e = \frac{3600}{H_u g_e} = 0{,}261$$

Индикаторный КПД

$$\eta_i = \frac{\eta_e}{\eta_\text{м}} = 0{,}316$$

Теперь рассчитаем степень повышения давления с наддувом с условием сохранения максимальной мощности $N'_e = N_e = 57$ кВт при режиме работы $n' = 6000$ об/мин. Выразим параметры рабочего цикла:

Средняя индикаторная мощность

$$N'_i = \frac{p'_i iV_h n'}{30\tau}$$

Среднее индикаторное давление

$$p'_i = p_i \frac{\rho_k}{\rho_0}$$

Плотность воздуха при нормальных условиях

$$\rho_0 = \frac{p_0 M_в}{R^0 T_0}$$

где $M_в = 29 \frac{кг}{кмоль}$

Откуда средняя эффективная мощность

$$N'_e = N'_i - N'_м$$

Составим равенство мощностей:

$$N_e = N'_e$$

$$\frac{p_i i V_h n}{30\tau} = \frac{p'_i i V_h n'}{30\tau}$$

$$p_i n = p_i \frac{\rho_k}{\rho_0} n'$$

$$\frac{p_0 M_в}{R^0 T_0} n = \frac{p_k M_в}{R^0 T_k} n'$$

$$\frac{p_0}{T_0} n = \frac{p_k}{T_k} n'$$

где $T_k = T_0 \left(1 + \frac{\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{ад.к.}} \right)$

примем адиабатический КПД компрессора $\eta_{ад.к.} = 0{,}7;$ а показатель адиабаты $k = 1{,}4$

Учтем также охлаждение наддувочного воздуха в интеркулере, примем его изобарным. КПД интеркулера выразим через соотношение температур:

$$\eta_и = \frac{T_{вп} - T_{вып}}{T_{вп} - T_{обд}}$$

где $T_{вп} = T_k$ – температура входящего в интеркулер воздуха после компрессора, $T_{вып} = T'_k$ – температура выходящего из интеркулера воздуха, $T_0 = T_{обд}$ – температура обдуваемого интеркулер воздуха, непосредственно с которым происходит теплообмен наддувочного воздуха через стенки интеркулера.

Примем $\eta_и = 0{,}65$; $T_{обд} = 293$ К, тогда получим температуру выходящего из интеркулера

$$T'_k = T_k - \eta_и (T_k - T_0)$$

Тогда после интеркулера получаем следующее приведенное равенство

$$\frac{p_0}{T_0} n = \frac{p_k}{T'_k} n'$$

$$\frac{p_0}{T_0}n = \frac{p_k}{T_k - \eta_и(T_k - T_0)}n'$$

$$\frac{p_0}{T_0}n = \frac{p_k}{T_0\left(1 + \frac{\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{ад.к.}}\right) - \eta_и\left(T_0\left(1 + \frac{\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{ад.к.}}\right) - T_0\right)}n'$$

$$p_0 n = \frac{p_k}{(1 - \eta_и)\left(1 + \frac{\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{ад.к.}}\right) + \eta_и}n'$$

$$(1 - \eta_и)\left(1 + \frac{\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{ад.к.}}\right) = \frac{p_k n'}{p_0 n} - \eta_и$$

Заменим $\frac{p_k}{p_0} = \pi_k$, подставим численные значения параметров и получим степенное уравнение, решить которое можно перебором значения π_k:

$$(1 - 0{,}65)\left(1 + \frac{\pi_k^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} - 1}{0{,}7}\right) = \pi_k \frac{6000}{10000} - 0{,}65$$

$$\pi_k^{\frac{2}{7}} = 1{,}2\pi_k - 1$$

Подстановкой находим примерное значение π_k при котором равенство справедливо:

$$\pi_k = 1{,}82, \text{тогда } \pi_k^{\frac{2}{7}} = 1{,}187 \approx 1{,}2\pi_k - 1 = 1{,}184$$

Таким образом, при степени повышения давления свежего заряда $\pi_k = 1{,}82$ теоретически возможно решение поставленной задачи. Это значит, что при установке системы турбонаддува с развиваемым избыточным давлением не менее 0,82 атмосферы и системой охлаждения наддувочного воздуха с КПД $\eta_и = 0{,}65$ возможно сохранение максимальных значений крутящего момента и мощности при снижении номинального режима работы ДВС Yamaha XJ6 с 10000 об/мин до 6000 об/мин.

Однако за установкой системы турбонаддува и охлаждения наддувочного воздуха следует большой объем работы по оценке теплонапряженного

состояния двигателя, разработке более работоспособной системы охлаждения, а также новых систем впуска и выпуска. Первостепенным является поиск комплекта турбокомпрессора под рассчитанные параметры. Также необходимо будет произвести модернизацию механизма газораспределения под параметры турбонаддува.

Для получения более точной и подробной картины сравнения исходного и модифицированного турбонаддувом варианта ДВС Yamaha XJ6N необходимо будет произвести тепловой расчет для обоих конфигураций, а также создать математические модели в ППП ALLBEA и GT-SUITE.

Стоит подчеркнуть, что турбонаддув, как способ увеличения мощностных характеристик ДВС, также актуален и для малообъемных силовых установок, используемых повсеместно, в том числе и в беспилотных транспортных средствах и летательных аппаратах.

Библиографический список

1. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа комбинированных и поршневых двигателей: учебник для студентов вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / В.П. Алексеев, В.Ф. Воронин, Л.В. Грехов и др.; под общ. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

2. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 496 с.

© Ильбактин И.У., Салатов Н.И., 2024

УДК 62.14.43

К.А. ИЛЬНИЦКИЙ
ilnickiykirill@gmail.com
Науч. руководв. – д-р техн. наук, профессор Р.Д. ЕНИКЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЕТ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВА АВТОМОБИЛЯ С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

Аннотация: двигатели внутреннего сгорания (ДВС) эффективен в очень малом рабочем диапазоне, что увеличивает потребление топлива. Применение электромотора снизит использование ДВС на низкоэффективных режимах работы, что уменьшит расход топлива. Для понимания эффективности данного

метода выполнить расчет расхода топлива легкого автомобиля с ДВС и сравнить с аналогичным с гибридной силовой установкой.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, гибридная силовая установка, топливная экономичность.

Введение Гибридные технологии серийно применяются в автомобилестроении с начала XXI века и к настоящему времени имеют серьезную долю на рынке. Количество их вариаций велико, такие как мягкие, параллельные, последовательные, последовательно-параллельные гибриды. Гибридные технологии применяются в качестве меры по снижения расхода топлива, уменьшения количества вредных выбросов, также для реализации полного привода.

Для расчет выбрана схема последовательно-параллельной гибридной силовой установки (ГСУ) схематично изображенная на рис.1, представляющая собой комбинацию бензинового двигателя и двух электромоторов, работающих независимо друг от друга по следующим сценариям:

1. Электропривод конвертирует чистую электроэнергию от аккумулятора для старта и ускорения. Когда водитель трогается с места или едет по городу, система использует только тяговый электромотор для движения автомобиля, получая электроэнергию от батареи. В этом режиме ДВС не работает и автомобиль едет как электромобиль.
2. Гибридный привод: используется как бензиновый двигатель, так и электромотор для большей мощности, и плавности. Система вырабатывает электроэнергию с помощью бензинового двигателя и передает мощность на колеса через тяговый электромотор. При необходимости система также потребляет электроэнергию от аккумулятора для обеспечения мощного ускорения.
3. Привод от ДВС: используется бензиновый двигатель для продолжительной езды на высокой скорости. При движении на высокой скорости, требующем меньшего крутящего момента, более эффективно полагаться на мощность ДВС, чем использовать электромотор на высоких оборотах.

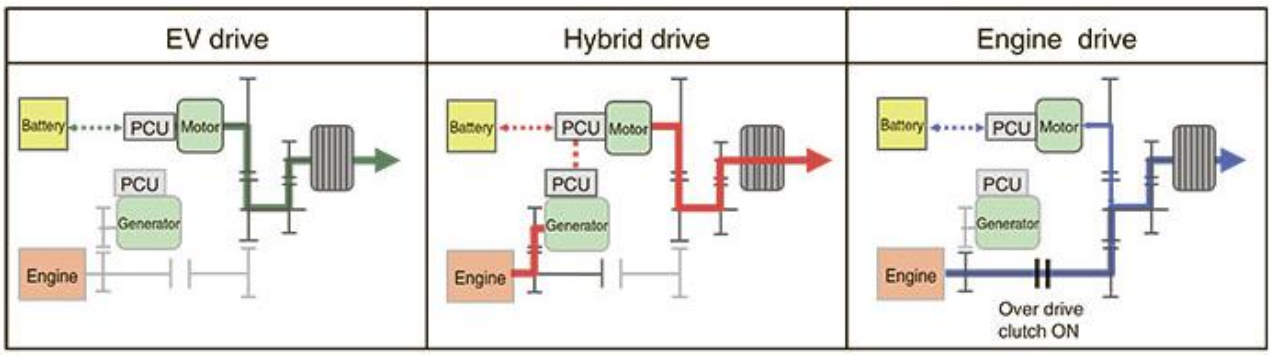


Рис. 1. Режимы работы гибридной силовой установки

Расчет потребления топлива

Для расчет гибридной силовой установки были взяты характеристик стандартного легкого автомобиля. Основные параметры для выполнения расчета указаны в таблице 1

Таблица 1

Характеристики легкого автомобиля

Наименование	Величина
Мощность ДВС, кВт	78
Масса автомобиля, кг	1160
Масса топлива, кг	37,5
Объем топливного бака, л	50
Коэффициент аэродинамического сопротивления *Cx*	0,353
Площадь поперечного сечения кузова автомобиля *S*, м2	2,55
Передаточное число механической трансмиссии *u*	3,64
КПД трансмиссии ηтр,	0,83
Диаметр колеса D, м	0,585
Удельный расход топлива г/кВт*ч	380

Расчет расхода топлива производится с помощью графика движения рис. 2, где скорость движения автомобиля ограничена 100 км/ч, а время самого движения составляет 1522 с. График поделен на зоны ускорения, равномерного движения и торможения для моделирования большинства условий езды в реальных ситуациях.

По формуле 1 путевого расхода вычислен расхода топлива автомобиля

$$Qs = \frac{g_{ен}\, k_\omega k_u (N_\sigma + N_в)}{10v\, \rho_T \eta_T}, \quad (1)$$

где $g_{ен}$ – удельный эффективный расход топлива двигателем на номинальном режиме, г/(кВт*ч); k_ω - коэффициент, учитывающий изменение удельного эффективного расхода топлива от номинального в зависимости от относительной частоты вращения; v - скорость автомобиля, км/ч; ρ_T - плотность топлива, кг/л.

Поправочные коэффициенты k_ω и k_u, формулы (5,6) функций относительной частоты вращения n/n_v и относительной нагрузки u, определяемая по формуле

$$u = \frac{N_\sigma + N_в}{N_e \eta_T}, \quad (2)$$

где $N_в$ – мощность двигателя по внешней скоростной характеристике, при частоте вращения, соответствующей рассматриваемому значению скорости, кВт

$$N_\sigma = \frac{G_a \psi v}{3600}, \quad (3)$$

$$N_в = \frac{0{,}5 c_x F v^3}{46656}, \quad (4)$$

G_a – полный вес автомобиль, 11375 Н; ψ – суммарный коэффициент сопротивления дороги равный 0,0012.

$$k_\omega = 0{,}8\left(\frac{n}{n_N}\right)^2 - \frac{n}{n_N} + 1{,}2, \quad (5)$$

$$k_u = 2{,}85u^2 - 4{,}35u + 2{,}52, \quad (6)$$

Так же величина расхода предельного для данной скорости значения расхода $Q_s{}'$ в л/100км в предположении, что двигатель работать по внешней скоростной характеристике:

$$Q_s{}' = \frac{g_{eн} k_\omega N_в}{10 v \rho_T}, \quad (7)$$

Таблица 2

Результаты расчета расхода топлива

v, км/ч	n, об/мин	$N_в$, кВт	N_σ, кВт	$N_в$, кВт	n/n_N	u	kω	ku	$\rho_в$	Q_s, л/100км	$Q_s{}'$, л/100км
10	2000	28	0,798	0,012	0,47	0,035	0,91	2,37	1.225	7,9	132,8
20	2700	36	1,595	0,0945	0,64	0,057	0,089	2,28		7,8	83
40	2600	35	3,2	0,76	0,62	0,14	0,87	1,98		7,9	41
60	2200	28	4,79	2,55	0,52	0,32	0,89	1,43		7,1	22
100	2500	32	7,98	11,82	0,56	0,75	0,89	0,86		6,9	14,9

Исходя из полученных данных, приведенных в таблице 2, среднее значение расхода топлива легкого автомобиля на режиме езды представленного на рис. 2, составляет 7,5 л/100км.

Сектора, указывающие режим работы ГСУ изображены на графике движения автомобиля рис. 2.



Рис. 2. График движения по времени и скорости

Проанализировав существующие автомобили с ГСУ для расчета, были взяты компоненты представленные в табл. 3. Электромотор и генератор смонтированы в единый корпус и установлены на место коробки переключения передач. Аккумуляторная батарея установлена под полом багажного отсека.

Таблица 3

Характеристики основных элементов гибридной силовой установки

Наименование	Величина
Мощность тягового электромотора, кВт	80
Крутящий момент тягового электромотора, Н*м	253
Масса автомобиля, кг	1280
Энергоемкость, Вт*ч	940
Номинальное напряжение АКБ, В	175

Расчет движения автомобиля на электротяге выполняется по следующим формулам:

Частота вращения электромотора при заданной скорости движения:

$$n_{\text{гм}} = \frac{60 * V}{3.6 * \pi * D}, \quad (8)$$

Сила сопротивления воздуха на скорости:

$$F_{\text{возд}} = \frac{C_x * S * \rho * v^2}{2}, \quad (9)$$

где ρ = 1,29 – плотность воздуха, выраженная в кг/м3.

Сила трения качения колес:

$$F_{тр} = f * (m_в + m_{авт}) * g * cos\ \alpha, \quad (10)$$

Сумма сил сопротивления движению автомобиля при движении с постоянной скоростью

$$F_{гм} = F_{тр} + F_{возд}, \quad (11)$$

Необходимое значение крутящего момента, для движения с постоянной скоростью:

$$M_{гм} = \frac{F_{гм} * D}{2}, \quad (12)$$

Необходимая выходная мощность силовой установки при движении со скоростью:

$$P_{вых} = F_{тр} * v, \quad (13)$$

Выдаваемая мощность АКБ, при движении с определенной скоростью:

$$P_{вх} = \frac{P_{вых}}{\eta_{зд}\eta_{кнт}}, \quad (14)$$

Часовой расход топлива:

$$G_т = N_e g_e 10^{-3}, \quad (15)$$

Результаты расчетов указаны в таблице 4

Таблица 4

Дальность хода на электротяге

v, км/ч	n, об/мин	$F_{возд}$, Н	$F_{тр}$, Н	$F_{гм}$, Н	$M_{гм}$, Н*м	$P_{вых}$, Вт	$P_{вх}$, Вт	$x_{зап}$, км
20	653	12	240	252	74	1400	2040	11
40	1400	50		290	84	3200	4600	8

Во время работы гибридной силовой установки со скорости 40 км/ч до 100 км/ч, ДВС работает в роли генератора:

- обороты: 2500 об/мин;
- мощность: 30 кВт;
- удельный расход топлива: 368 г/(кВт*ч).

Режим генератора, длится 300 с, пройденное расстояние составит 3,4 км. Часовой расход топлива на данном режиме 11 кг/ч. На скорости 100 км/ч электромотор не эффективен и движение осуществляется за счет бензинового двигателя, через прямую передачу, показатели расхода топлива указаны в таблице 2. Пройденное расстояние составит 33,3 км. Во время торможения современные двигатели не потребляют топлива. Исходя из выше указанных данных средний расход топлива на графике движения рис. 2., составляет 4,5 л/100км.

Заключение: была построена циклограмма движения автомобиля, на основании которой был выполнен расчет расхода топлива. Для бензинового двигателя средний расход составил 7,5 л/100 км, а для ГСУ 4,5 л/100 км. С учетом увеличения массы автомобиль стал экономичнее на 40%.

Библиографический список

1. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2003. – 496 с.
2. Армеев А.С. Определение расхода топлива гибридного двигателя автомобиля // Сб. науч. Статей 3-й Международной молодежной науч.-практ. конф., Курск, 22-23 сентября 2016, 18–21 с.
3. Павлова, Е.И. Экология транспорта: учебник для вузов / Е.И. Павлова. – М.: Высшая школа, 2006. – 344 с. (дата обращения: 03.12.2023).
4. Мальцев Д.И., Золотарев О.В., Ларионов Е.И. Исследование существующих гибридных автомобилей // Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докл. IX Междунар. кауч.-практ. конф. Студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х т. 2018. С. 161–165.
5. Aldhafeeri, T.; Tran, M.-K.; Vrolyk, R.; Pope, M.; Fowler, M. A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives. Inventions **2020**, 5, 28. (дата обращения: 17.10.2024).
6. Mevawalla, A.; Panchal, S.; Tran, M.-K.; Fowler, M.; Fraser, R. Mathematical Heat Transfer Modeling and Experimental Validation of Lithium-Ion Battery Considering: Tab and Surface Temperature, Separator, Electrolyte Resistance, Anode-Cathode Irreversible and Reversible Heat. Batteries **2020**, 6, 61.
7. EV design – energy consumption / [Электронный ресурс] // x-engineer Engineering Tutorials: [сайт]. – URL: https://x-engineer.org/ev-design-energy-consumption/ (дата обращения: 10.11.2024).
8. Geetha, A. and Suramani, C., A comprehensive review on energy management strategies of hybrid energy storage system for electric ehicles, *International Journal of Energy Research*, Vol. 41, No. 13, 1817–1834, 2017

© Ильницкий К.А., 2024

УДК 621.43.056

Т.Ф. МАМАТОВ
Mamat2281337@mail.ru
Науч. руководов. – ст. преподаватель Р.Ф. ЗИННАТУЛЛИН, аспирант 4 курса А.А. МЕЛКОВ
Уфимский университет науки и технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА АВИАЦИОННОМ КЕРОСИНЕ

Аннотация: двухтактный двигатель, работающий на авиационном керосине, представляет собой высокоэффективный тип двигателя внутреннего сгорания.

Основное преимущество двухтактного двигателя – это компактность и легкость конструкции, что делает его идеальным вариантом для малых летательных аппаратов и беспилотных систем. Обсуждаются перспективы развития двухтактных двигателей в авиации и возможности их применения в будущем.
Ключевые слова: топливная аппаратура; двухтактный двигатель, авиационный керосин, непосредственный впрыск.

В современном авиационном секторе наблюдается острая необходимость в разработке более эффективных и компактных авиационных двигателей мощностью от 4 до 16 лошадиных сил, работающих на авиационном керосине. Использование авиационного керосина – одного из видов тяжелых топлив – предоставляет множество преимуществ по сравнению с традиционными бензиновыми двигателями. Прежде всего, наличие керосина упрощает логистику топливоснабжения и хранения, в авиации. Также он более безопасен в обращении, что делает его предпочтительным выбором в условиях повышенных требований к безопасности.

В авиации также важно учитывать требования к повышению удельной мощности двигателей (а именно меньшей массогабаритности и большей мощности) и снижению экономичности. В этой связи использование двухтактных двигателей с непосредственным топливом, становится особенно актуальным. Двухтактные двигатели, как правило, имеют более простую конструкцию и меньшее количество движущихся частей, что способствует их меньшему весу. Их конструкции обеспечивают высокую эффективность при компактных размерах, что делает их идеальным решением для малой авиации.

На примере компаний, занимающихся разработками в данной области, можно заметить, что применение непосредственного пневматического впрыска топлива в сочетании с правильно подобранными углами опережения зажигания значительно повышают производительность двухтактных двигателей [Orbital]. Это подчеркивает важность продолжения исследований в области создания современных двигателей на керосине, что и являлось целью данной работы.

Объектом исследования в данной работе выбран двухтактный двигатель внутреннего сгорания NGH-35GT, имеющего мощность четыре лошадиные силы. Технические характеристики данного двигателя приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики двухтактного двигателя «NGH-35GT»:

Характеристика	Значение
Масса двигателя	1150 г.
Рабочий объём	34.96 $см^3$
Ход поршня	32 мм

На рис. 1 изображена модель двухтактного двигателя с системой пневматического впрыска керосина, реализующей непосредственный впрыск. Основные технические характеристики топливной аппаратуры приведены в таблице 2. Она состоит из поршневого компрессора – переработанный имеющийся двигатель Мк-17, в котором происходит совместное сжатие топлива и воздуха. Рабочий объем компрессора составляет 4,23% от рабочего объема двигателя. Давление впрыска, создаваемое данной аппаратурой, достигает 2 МПа.

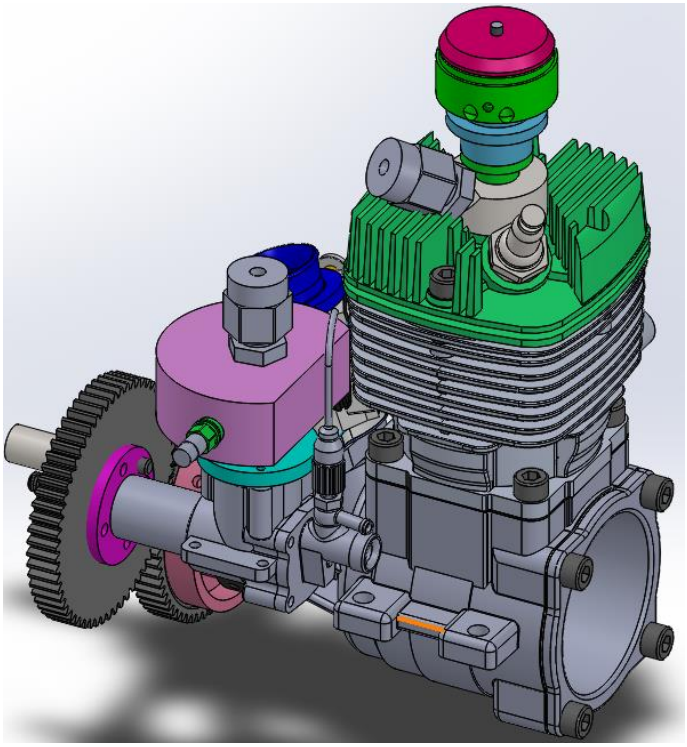


Рис. 1. Модель двигателя системой пневматического впрыска керосина

Таблица 2

Технические характеристики топливной аппаратуры «Мк-17»

Характеристика	Значение
Масса двигателя	130 г.
Рабочий объём	1.48 $см^3$
Ход поршня	11.4 мм

Подача топливовоздушной смеси из компрессора в двигатель осуществляется через топливопровод.

Привод компрессора осуществляется через прямозубые зубчатые шестерни.

Распылитель с электромагнитным управлением имеет 4 сопла диаметром 0,2 мм. Использование многосоплового распылителя повышается качество распыливания, что позволяет каплям быстрее испаряться. Поскольку в двухтактных двигателях степень сжатия ниже четырехтактных, то организовывать поздний впрыск для снижения вероятности возникновения детонации нет необходимости. Поэтому впрыск будет осуществляться перед полным закрытием выпускного канала двигателя, на протяжении около 120 градусов ПКВ.

Масса двигателя при использовании системой пневматического впрыска керосина увеличилась на 0,25 кг, обусловлено это тем, что используется компоновка уже имеющихся деталей КШМ Мк-17. При этом данная система позволит снизить расход топлива до 1,5 раз.

Библиографический список

1. М.Д. Гарипов, Р.Ф. Зиннатуллин, А.А. Мелков, В.А. Шаяхметов, Э.М. Халилов, Р.Ю. Сакулин. Статья: Экспериментальное исследование возможности бездетонационного сгорания авиационного керосина в четырехтактном двигателе с искровым воспламенением – Уфа, УУНиТ, 2024.

2.М.Д. Гарипов, Р.Ф. Зиннатуллин, А.А. Мелков, В.А. Шаяхметов, Э.М. Халилов. Статья: Исследование дисперсного состава двухфазной струи системы впрыска авиационного керосина – Уфа, УУНиТ, 2024.

© Маматов Т.Ф., 2024

УДК 621.43

М.И. МАТЕШУК
miron.mateshuk@mail.ru
Науч. руковод. – д.т.н. профессор, зав. кафедрой ДВС Р.Д. ЕНИКЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ БЕНЗОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА

Аннотация: цель работы – совершить анализ малоразмерных генераторных установок. Понять каким должен быть проектируемый малоразмерный двигатель который будет являться силовой установкой для бензоэлектроагрегата, создать эскизный проект.
Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания (ДВС); мощность; бензогенератор; двухтактный двигатель; ребра охлаждения; тепловой расчет;

Что бы определить каким должен быть двигатель для бензоэлектроагрегата нужно изучить рынок производимых и производившихся моделей двигателей и энергоустановок, учесть особенности необходимые для их использования, и на основании данного анализа создать эскизный проект двигателя, определить его в составе установки.

Вопрос силовой установки для гражданских малых энергоустановок отечественной разработки стоит давно.

Ранее производился малоразмерный двухтактный двигатель 2СД-М1 адаптированный из двигателя мотоцикла “Минск”. Он был адаптирован под работу в стационаре в частности в составе генераторной установки АБ-1/230.

Двигатель оснастили магнето, крыльчаткой принудительного охлаждения, ручным стартером.

Сейчас в нашей стране не производится электрогенераторы с ДВС за исключением крупных дизельных установок. Производство Малых гражданских источников питания отсутствует. Существуют лишь импортные аналоги в которых применяются различные двигатели.

Рассчитываемый Двигатель должен быть простым, надежным, легким и мощным. Простым в обслуживании и ремонто пригодным. Упор сделан на максимальную простоту конструкции, упрощение и выбор двухтактного цикла также применены из-за того, что агрегат должен иметь малый вес. Таким образом это будет двухтактный двигатель стационарный, принудительного воздушного охлаждения, с кривошипно камерной продувкой, газораспределением юбкой поршня перекрывающей окна. С полусферической камерой сгорания. Система питания самотеком через топливный кран в карбюратор поплавкового типа. Зажигание от маховичного магнето находящегося под крыльчаткой охлаждения. Такая компоновка оказывается самой простой, дешевой, и легкой.

Произведен тепловой расчёт двигателя, расчёт кинематики и динамики, и прочностной расчет всех деталей и основных узлов.

Определены технические требования к двигателю: 8кВт при 6000 об/мин, 1 цилиндр.

Принятые:

Геометрическая СЖ=10, фактическая 8,2, коэффициент наполнения 0,6, бензин АИ-92 а=0,95

Полученные данные в результате теплового расчёта:

Pz=5,7Мпа
S/D=58/62
Рабочий обьем 0,175см3
Ne=8,3КВт
Me=12,7Н*м
Pe=0,47 МПа
Ucp=11,6 м/с на 6000
ge=397 гр КВт ч

Далее исходя из расчётов на прочность были выбраны основные геометрические параметры деталей двигателя. На их основе спроектированы модели в Solid works.

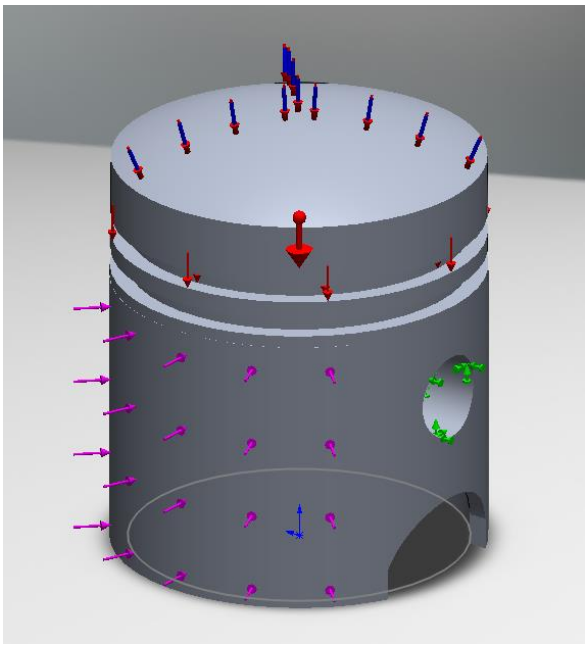


Рис. 1.

Эти модели были проверены на прочность в среде simulation, результаты проверки подтверждают расчёты.

На основании выполненных объёмных моделей Выполнены чертежи всех основных деталей по ЕСКД.

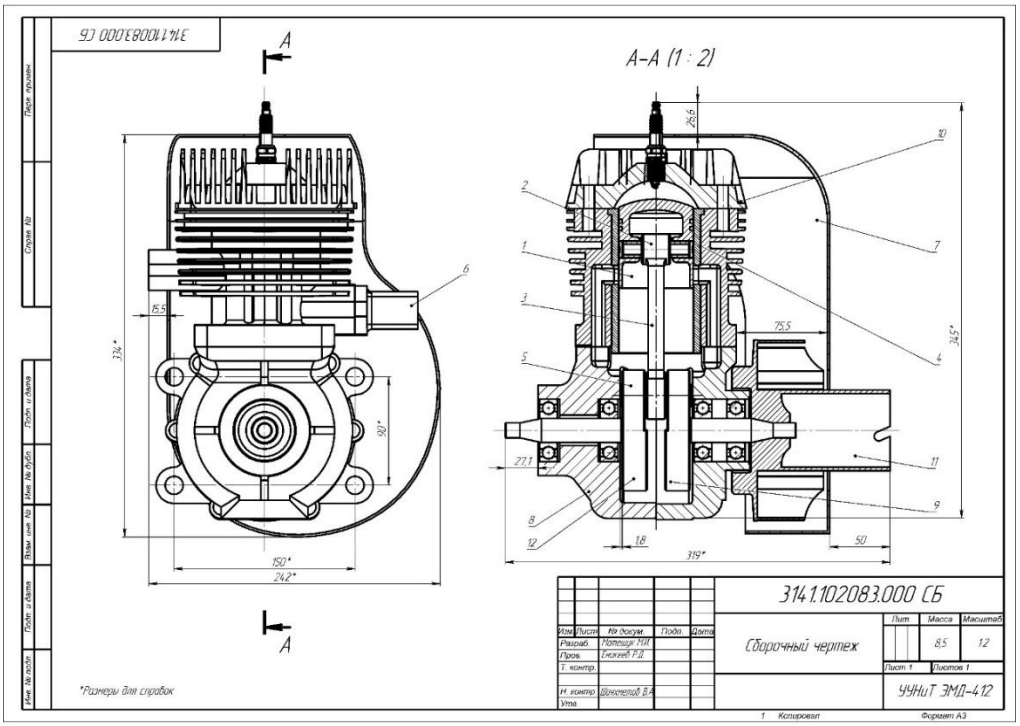


Рис. 2.

Определен конструктив будущего двигателя:

Поршень литой, из алюминиевого сплава, под два компрессионных кольца.

Палец стальной. Шатун не разъёмный на роликовом игольчатом подшипнике, с бронзовой втулкой под палец в поршневой головке. Колен вал с впрессованной шейкой с цельно точенными цапфами и противовесами. Собирается вместе с шатуном и подшипником.

Гильза цилиндра чугунная, хонингованная с двумя продувочными, двумя выпускными и одним впускным окнами Впрессованная в литую алюминиевую рубашку с ребрами охлаждения. Головка цилиндра отдельная с резьбой под свечу зажигания.

Исходя из размеров основных деталей КШМ и ЦПГ будущего двигателя разработаны корпусные элементы, картер двигателя состоящий из двух половин с посадками под подшипники коренных шеек колен вала. На одной из половин находятся проушины крепления двигателя к раме.

исходя из теплового баланса рассчитана площадь ребер охлаждения и крыльчатка.

Крыльчатка с 16 лопастями и прорезями на шкиве для пускового шнура, направляющим кожухом, присоединенным к корпусным деталям двигателя. Общий вид двигателя показан на сборочном чертеже.

Далее вид двигателя в составе всей установки, двигатель крепится к раме через четыре проушины с сайлентблоками. Соединяется с валом генератора через фланцы и эластичную муфту. Установка компактная, оборудована топливным баком на 9 литров, блоком приборов, выполняющим роль защитного щитка генератора, двигатель оборудован глушителем и карбюратором. Предусмотрено дополнительное место для прочих элементов установки.

В результате работы был рассчитан малоразмерный двухтактный карбюраторный двигатель принудительного воздушного охлаждения, с кривошипно камерной продувкой.

Показатели двигателя подходят для его использования в качестве силовой установки в бензоэлектроагрегатах с выходной мощностью 4кВт.

Двигатель также был представлен в составе всей установки в трехмерной модели. В ней предусмотрена трубчатая рама, щиток приборов также выполняющий роль защитного щитка, топливный бак с краном подачи топлива, глушитель шума выпуска двигателя, и электрогенератор. Крепление двигателя к раме подразумевается через массивные проушины на картере, в которые впрессованы сайленблоки. Благодаря малоразмерному двухтактному двигателю с относительно высокой удельной мощностью бензоэлектрогенераторная установка будет компактной и легкой. А благодаря простоте конструкции двигателя еще и простой в обслуживании и ремонт пригодной.

Библиографический список

1. Колчин, А.И., Демидов, В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк. 2008. – 496 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов втузов обучающихся по специальности "Двигатели внутреннего сгорания" / Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; Под ред. Орлина А.С., Круглова М.Г. М.: Машиностроение. 1984. – 384 с.
3. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т. 2. М.: Машиностроение. 2001. – 912 с.
4. Зейнетдинов, Р.А., Дьяков, И.Ф., Ярыгин, С.В. Проектирование автотракторных двигателей. Учебное пособие Ульяновск: УлГТУ. 2004.168 с.
5. Методические указания по моделированию рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания в интерактивной системе имитационного моделирования <<АЛЬБЕЯ>> / Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. Сост. Губайдуллин И.С., Загайко С.А., Рудая Н.В., Рудой Б.П., Хисматуллин К.А. Уфа, 1996. – 41 с.
6. Моделирование механических потерь ДВС в системе имитационного моделирования <<АЛЬБЕЯ>>. Методические указания для бакалавров направления “Энергомашиностроение” / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Сост. С.А.Загайко. Уфа, 1996. – 74 с.
7. Задачи конструирования двигателей в SolidWorks: Задачник / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: С.Н. Атанов, С.А. Загайко, Р.Ю. Сакулин. Уфа. 2008. – 84 с.
8. Рабочие процессы и конструирование двигателей, работающих на биотопливах: Лабораторный практикум по COSMOSWorks: Практикум / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Сост.: С.А. Загайко, И.Б. Рудой, Р.Ю. Сакулин. Уфа. 2008. – 78 с.

© Матешук М.И., 2024

УДК 62.123.4

Д.Ю. МУРАВЬЕВ
denismyravev@yandex.ru
Науч. руководов. – Доктор технических наук М.Д. ГАРИПОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАСЛЯНОГО НАСОСА ГЕРОТОРНОГО ТИПА

Аннотация: в данной статье рассматривается процесс проектирования масляного насоса героторного типа. Проведен анализ основных параметров, описаны метод расчета героторного насоса.

Ключевые слова: героторный насос; проектирование; гидравлическая система; параметры насоса; производительность.

Введение

Масляные насосы героторного типа широко применяются в масляных системах благодаря их компактности, высокой производительности и надежности. Основное преимущество героторных насосов заключается в простой конструкции, обеспечивающей плавный поток рабочей жидкости и минимизацию пульсаций.

Методика проектирования

Проектирование героторного насоса требует анализа факторов, определяющих его эксплуатационные характеристики и надежность. Этот процесс можно разбить на несколько ключевых этапов:

1. Сбор исходных параметров: расход (Q), давление (P), количество оборотов за одну минуту (n), КПД насоса (ŋ).
2. Расчет и создание геометрических параметров роторов.
3. Создание CAD-модели.
4. Расчет дополнительных параметров: мощность (N), скорость потока (S).

Этапы проектирования.

1. Расход определяется необходимым объемом жидкости, который должен быть перекачан за определенный промежуток времени. Обычно измеряется в л/мин. Далее задается давление, которое должно быть внутри камеры с рабочим объемом. Затем определяются обороты, на которых будет работать насос, и определяется КПД. Средний КПД масляных насосов героторного типа варьируется от 85% до 90%.

2. Для расчета и создания геометрических параметров воспользуемся программой Excel. Первым шагом будет определение количества зубьев внутреннего (k_1) и внешнего (k_2) ротора. Внешний ротор имеет на один зуб больше чем внутренний. Второй шаг – это определение объема рабочей камеры. Рабочая камера это объем масла перемещаемого насосом за один оборот внутреннего ротора. Объем рабочей камеры определяется по формуле:

$$V = \frac{Q}{n}$$

Третий шаг — это определение радиусов внешнего (R_1) и внутреннего (R_2) роторов. Они рассчитываются по формулам:

$$R_1 = \frac{V}{\pi \cdot k_1}$$

$$R_2 = \frac{R_1 - k_2}{k_1}$$

Четвертый шаг — это расчет глубины профиля зуба. Она зависит от радиусов роторов, и определяется по формуле:

$$h = \frac{R_2 - R_1}{2}$$

После определения основных геометрических параметров, нужно построить профили внутреннего и внешнего роторов. Это делается по следующим формулам:

Внутренний ротор:

$$x_1 = (R_1 + e) * cos\alpha - r_1 * \cos(\frac{R_1 + e}{r_1 * \alpha})$$
$$y_1 = (R_1 + e) * sin\alpha - r_1 * \sin(\frac{R_1 + e}{r_1 * \alpha})$$

Внешний ротор:

$$x_2 = (R_2 + e) * cos\alpha - r_2 * \cos(\frac{R_2 + e}{r_2 * \alpha})$$
$$y_2 = (R_2 + e) * sin\alpha - r_2 * \sin(\frac{R_2 + e}{r_2 * \alpha})$$

Где e – эксцентритет, r_1-радиус малой окружности обкатывающейся по окружности радиусом R_1, r_2-радиус малой окружности обкатывающейся по окружности радиусом R_2, α угол в градусах.

x	y	z
12.6398	0	0
13.34415	-5.48506	0
11.60773	-14.4901	0
10.8301	-14.6382	0
-10.5362	-14.6495	0
-11.2712	-14.5753	0
-13.7535	-6.9573	0
-12.7944	-2.55392	0
-12.8189	13.89363	0
-11.959	14.36591	0
9.471385	14.50753	0
10.24994	14.63751	0
14.49732	9.428829	0
14.07724	7.999095	0
13.8671	-12.8561	0
13.15976	-13.627	0
-7.08652	-13.7926	0
-9.01916	-14.3888	0
-14.6493	-10.5056	0
-14.5757	-9.79235	0
-14.4788	11.6445	0
-14.098	12.50187	0
0.279152	12.64165	0
5.665468	13.39012	0
14.50098	11.57112	0
14.64058	10.79814	0
14.64944	-10.5669	0
14.568	-11.3062	0
6.82318	-13.7133	0
2.294434	-12.7646	0

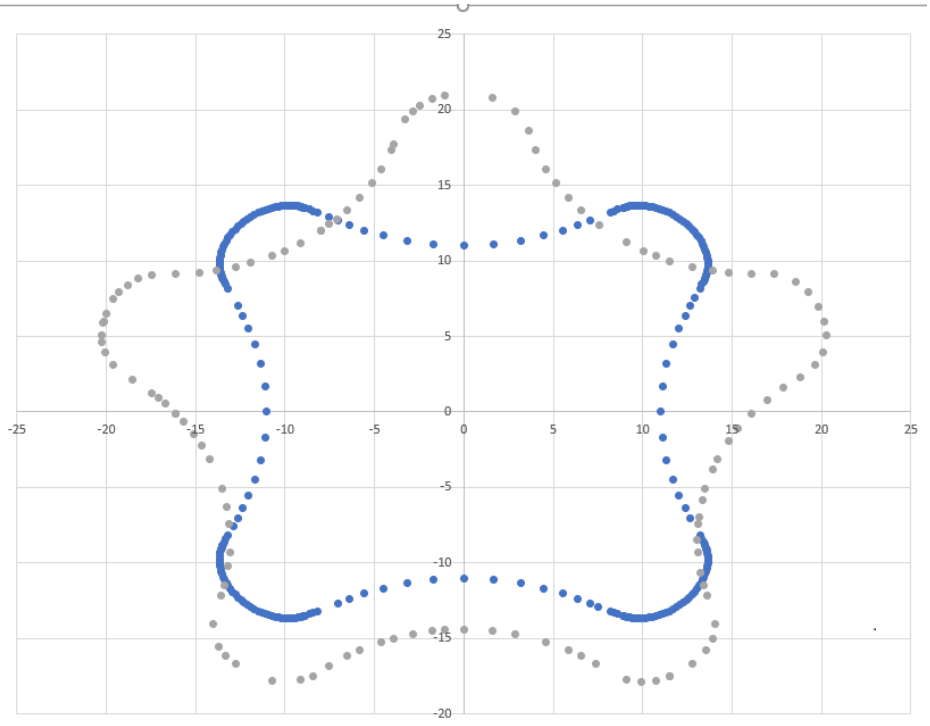


Рис. 1. Координаты внутреннего и внешнего роторов.

1. Для создания CAD-модели нужно обратиться к программе SolidWorks. Надо взять координаты полученные во втором пункте и построить CAD-модель. Получается следующее:

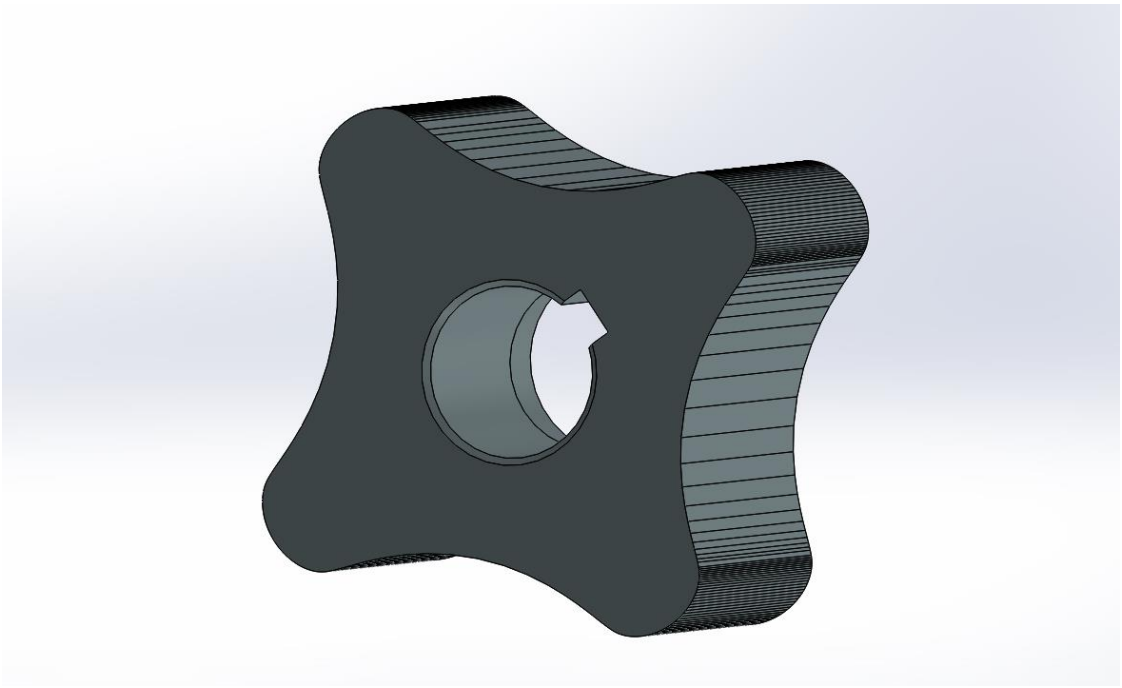


Рис. 2. Внутренний ротор

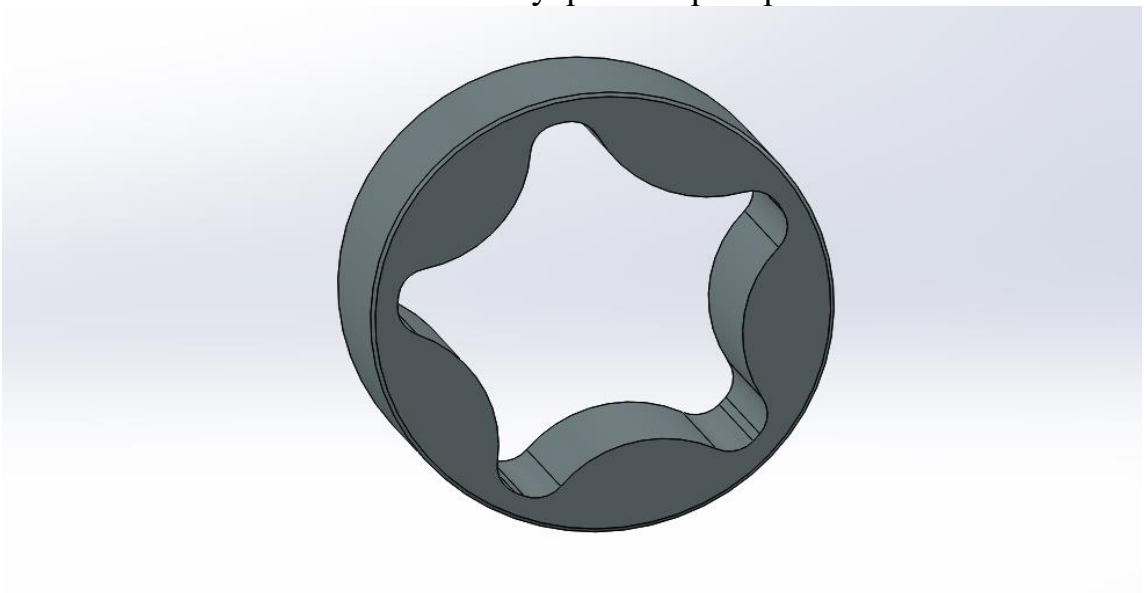


Рис. 3. Внешний ротор

2. После создания CAD-модели нужно рассчитать дополнительные параметры, такие как мощность (N) и скорость потока (S). Они определяются по следующим формулам

Заключение

Представленная методика позволяет эффективно проектировать масляные насосы героторного типа с заданными параметрами. Применение автоматизированных средств проектирования значительно упрощает процесс расчета и улучшает точность итоговых конструкций.

Библиографический список

1. Юдин, Е.М. Шестеренные насосы / Е.М. Юдин. – Москва: Машиностроение, 1964.
2. Башта, Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем / Т.М. Башта. – Москва: Машиностроение, 1974.
3. Басуров, В.М. Системы автомобильных и тракторных двигателей: практикум / В.М. Басуров, В.В. Белов. – Владимир, 2001.
4. Саенко, В.П. К расчету героторных гидромашин / В.П. Саенко, Р.Н. Горбатюк // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 7.

© Муравьев Д.Ю., 2024

УДК 621.432.3

В.Р. МУХАМЕТОВ
vadimugatuemd@mail.ru
Науч. руководов. – канд.техн.наук, доцент С.А. ЗАГАЙКО

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ В ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЕ ДВС

Аннотация: цель работы – анализ пары трения «поршневое кольцо – цилиндр», ее математическая модель изнашивания и потерь на трение с учетом режимов трения. Проведены расчеты основных характеристик данного двигателя. Проведены расчеты, нацеленные узнать приближенные значения мощности потерь и изнашивания за цикл в двигателе.
Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания (ДВС); мощность; потери; изнашивание; кольцо; цилиндр; пара трения.

В двигателе цилиндропоршневая группа (ЦПГ) является одним из главных узлов трения. Именно от этого узла трения зависит расход масла, экономичность подаваемого топлива, долговечность, виброустойчивость. К этой группе предъявляется серьезные требования, так как процессы, проходящие в нем, влияют на ресурс всего двигателя.

Немаловажную роль играют в ЦПГ кольца компрессионные и маслосъемные. В верхней канавке используют компрессионные кольца для плотного сгорания и создания давления. В нижней – используют маслосъемные для удаления излишки масла. В зависимости от конструкции поршня могут применяться несколько колец.

Пара трения “поршневое кольцо - цилиндр” весомо влияет на изнашивание и мощность потерь в двигателе. Моделирование и анализ этой пары в дальнейшем может помочь повышению КПД и долговечности двигателя.

Моделирование изнашивания и потерь на трение в паре трения «Поршневое кольцо – цилиндр». Исследование полученных характеристик двигателя.

Объектом данного исследования является 4-х тактный бензиновый рядный двигатель с характеристиками:

n = 4600 об/мин (частота вращения);

ε = 8,5 (степень сжатия);

$V_л$ = 1,644 л (объем двигателя);

$N_e = 65$ кВт (мощность);

i = 4 (количество цилиндров).

Расчет и моделирование выполнялись в программе *MicrosoftOfficeExcel*

В основе методики расчета механических потерь в узлах трения ДВС лежат математические модели, созданные на основе молекулярно-механической теории трения. Это позволяет оценить потери, возникающие как при граничном, так и при полужидкостном, либо жидкостном трении.

Для расчета механических потерь в парах трения применяется классическая схема, которая включает определение коэффициента трения, силы трения в узле и мощности потерь в узле.

В поршневых кольцах на механические потери в значительной степени влияет давление в заколечных объемах, а распределение этих объемов зависит от плотности газа в кольцевых уплотнениях. Эти объемы могут быть рассмотрены как лабиринтные уплотнения, через которые происходит течение газа.

Математическая модель расчета механических потерь в поршневых кольцах выполнена на основании полуэмпирических закономерностей, выведенных Крагельским И.В.

Мгновенная мощность потерь на трение $N_{тр}$, [Вт], определится по следующей формуле:

$$N_{тр} = F_{тр} \cdot V_p.$$

Изнашивание материалов представляет собой процесс, в ходе которого поверхностные слои трущихся тел разрушаются, что вызывает уменьшение размеров тел в перпендикулярном направлении к поверхности трения. Интенсивность изнашивания пар трения зависит от свойств материалов, технологической подготовки поверхностей, их качества, а также условий эксплуатации, включая нагрузки, температуру, смазку и т.д.

Математическая модель изнашивания пары трения представлена следующей формулой:

$$I = K_3 \alpha K_{tv} p E^{t_y - 1} \Delta^{0,4 t_y} \left(\frac{H_в}{R_в}\right)^{0,1 t_y} \left(\frac{k f_M}{\sigma_0}\right)^{t_y}.$$

Критическая толщина смазочной пленки:

$$h_{кр} = h_к + h_ц$$

где $h_к$ – высота микронеровностей поверхности кольца;

$h_ц$ – высота микронеровностей поверхности гильзы цилиндра.

Оцениваем вид режима трения: условие ($h_{см} > h_{кр} + 2$ мкм) справедливо, то на контакте имеет место режим жидкостного трения.

Коэффициент жидкостного трения в общем случае определяется широко известной зависимостью, выраженной формулой:

$$f_ж = C \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot V}{P}}$$

Коэффициент полужидкостного трения будет иметь вид:

$$f_п = f_s - \frac{n \cdot V_r}{P_a \cdot h_{см}}$$

где

$$f_s = \frac{\tau_0}{P_г} + \beta + 0{,}23 \cdot \alpha_г \cdot \Delta^{0,4} \cdot (P_c \cdot \theta)^{0,2}$$

Исходные данные для расчета потерь в поршневых кольцах представлена в табл.1:

Таблица 1

Исходные данные

D, м	$h_{ком}$, м	$t_{ком}$, м	$h_{масл}$, м	$t_{масл}$, м	$E_к$, МПа	$E_ц$, МПа	$\mu_к$	$\mu_ц$
0,082	0,0025	0,00328	0,0015	0,002	110000	100000	0,24	0,25
НВ, МПа	$h_к$, мкм	$h_ц$, мкм	$К_в$	v_w	K_w	α, мм^2/Н	n, Па·с	R_w, мкм
170·10^7	0,3	0,4	1,8	2	1,3	0,02	0,137	12600
τ_0,МПа	β	$\alpha_г$	Δ, мкм	A_0, м	$\rho_{кр}$, мкм			
0,1	0,1	0,01	0,0012	0,01107	5000			

После всех расчетов и вычислений получили диаграмму мощности потерь колец, представленной на рисунке 1:

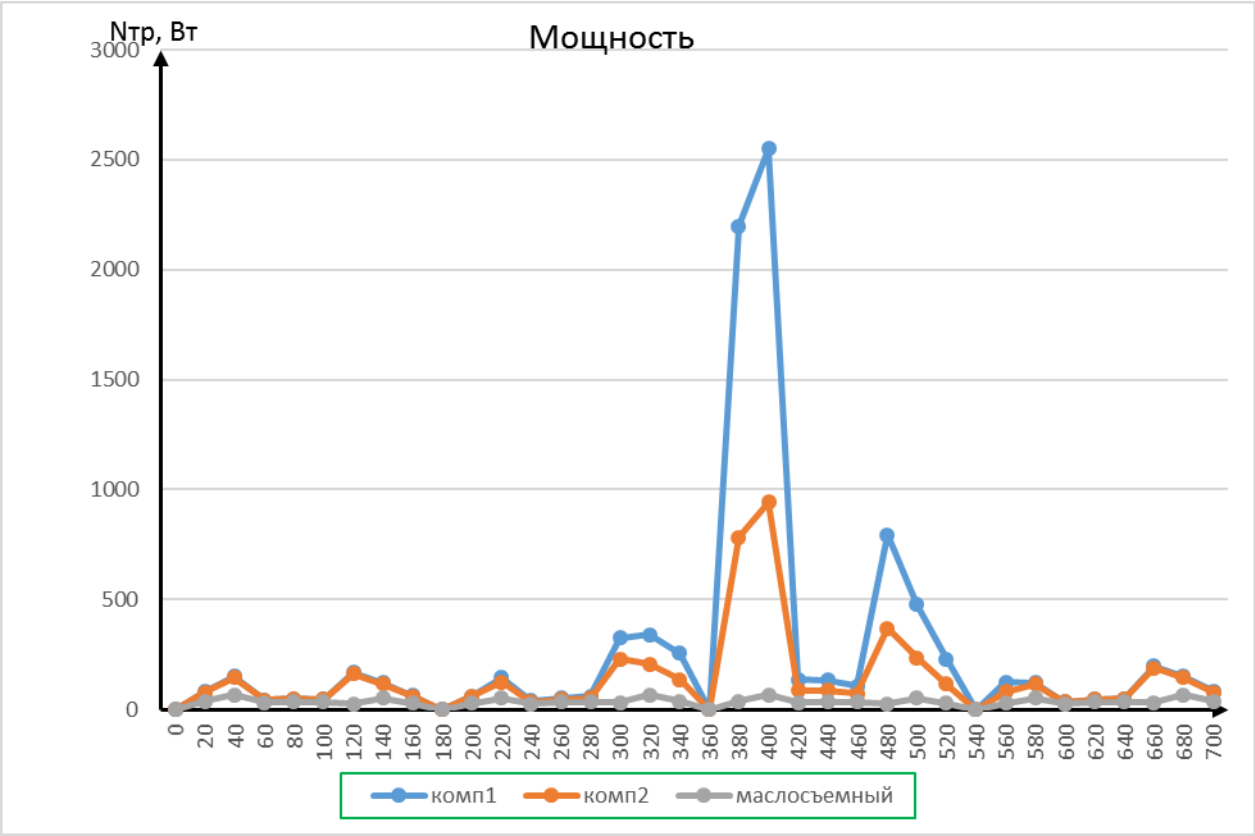


Рис. 1. Мощность потерь на трение в кольцах

При расчете изнашивания нужно учесть, что в 60-100, 240-280, 420-460, 600-640 градусов ПКВ действует жидкостное трение, следовательно соприкосновение поверхностей и их трение не будет осуществляться.

Исходные данные для расчета износа в поршневых кольцах представлены на табл. 2:

Таблица 2

Исходные данные

S, м	λ	R, м	R_a, мкм	σ_0, кгс/см2	T_y	v	p_a
0,078	0,0285	0,039	0,08	6600	4,1	2	1
E	t_0	b	n, об/мин	α_g	k	K_1	H_B, мкм
2	0,5	2	4600	3	5	0,2	1,3
R_B, мкм	K_{tv}	$E_{пр}$	α	f_m	Δ	L, м	Материал
12600	15	8000	1	6	0,0017	0,078	Чугун 4НМХ

Выполнив все расчеты, получили диаграмму изнашивания кольца от угла ПКВ и изнашивание цилиндра по ходу поршня:

На рисунке 2 представлен износ кольца по углу поворота коленчатого вала (ПКВ):



Рис. 2. Износ кольца по углу ПКВ

На рисунке 3 представлен износ цилиндра по ходу поршня:



Рис. 3. Износ цилиндра по ходу поршня

В данной работе, изучив полученные данные и диаграммы, можно отметить, что:

1) режимы трения довольно сильно влияют на мощностные потери и изнашивание;

2) учет режимов трения в дальнейшем может увеличить ресурс узлов, а также более точно рассчитывать мощностные потери для разных двигателей.

3) пик изнашивания на цилиндр и кольца в двигателе приходится на такт рабочего хода в районе 400 градусов по углу ПКВ;

4) большая часть потери мощности приходятся на такт рабочего хода для компрессионного кольца и достигают свыше 2500 Вт;

Проанализировав модель изнашивания пары трения, можно понять, что на нее влияют множество факторов, которые нужно учитывать при расчете. А также данный метод расчета имеет потенциальную ценность для инженеров, поскольку он обеспечивает следующие возможности:

- вычисление потерь мощности на трение с использованием расчетов;
- определение влияния различных параметров процесса, а также физико-механических свойств материалов и смазок на износ;
- перенос результатов наблюдений, выполненных в одних условиях, на другие;
- прогнозировать ресурс ДВС на различных режимах его работы.

Библиографический список

1. Загайко С.А. Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: учебное пособие / С.А. Загайко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 123 с.
2. Загайко С.А. Математическое моделирование изнашивания деталей ЦПГ ДВС // Вестник УГАТУ, 2013. Т. 17, № 3, (56). С. 231–238. URL: http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/1611/1467
3. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов./А.И. Колчин, В.П. Демидов – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. Шк., 2002. – 496 с.: ил.
4. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
5. Крагельский И.В., Алисин В.В. Трение изнашивание и смазка: справочник 1 книга./Крагельский И.В., Алисин В.В. – 1978. – 91 с.
6. Крагельский И.В., Алисин В.В. Трение изнашивание и смазка: справочник в 2-х книгах./Крагельский И.В., Алисин В.В. – М.: Машиностроение – 1978. – 400 и 358 с.
7. Макаров А.Р., Смирнов С.В. Математическое моделирование движения поршня в цилиндре // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. №2(20) т.1. с. 30.
8. Орлин А.С., Круглов М.Г. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей: 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.: ил.
9. Сапронов Ю.И. Моделирование течением жидкости посредством редуцированных уравнений / Сапронов Ю.И., Карпова А.П., Конев В.В., Коротких А.С. Вестн. Воронеж. Гос. ун-та. Сер. Физика, математика. – 2014 № 2. – 188 с. URL: http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/physmath/2014/02/2014-02-15.pdf (дата обращения: 14.05.23)
10. Чичинадзе А.В. Справочник по трибототехнике. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, – 1989. – 398 с.

11. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б. Моделирование параметров трения и износа ЦПГ двигателя в реальном эксплуатационном цикле // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 1. с. 29.

12. Koszalra, Grzegorz, Krzaczek P. «Energy Losses Related to Ring Pack Wear in Gasoline Car Engine» Energies 2022. URL: https://doi.org./10.3390./en15249570.

© Мухаметов В.Р., 2024

УДК 621.43.056

П.Л. НЕКРАСОВ
petrnekrasov61@gmail.com
Науч. руководитель – ст. преподаватель М.Д. ГАРИПОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОРСУНКИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ЕГО КОМПОНОВКА В ГОЛОВКЕ ДВИГАТЕЛЯ РАБОТАЮЩЕГО НА АВИАЦИОННОМ КЕРОСИНЕ

Аннотация: в данной статье приводится принцип работы форсунки с электромагнитным управлением, процесс моделирования форсунки и компоновка в головке двухтактного поршневого двигателя.
Ключевые слова: форсунка; моделирование; компоновка; двигатель.

Использование двухтактных авиационных двигателей несёт в себе множество плюсов таких как: большая удельная мощность двигателя, простота производстве и ремонте, компактность и прочее. Работа поршневого двигателя на авиационном керосине представляет собой особый интерес, ведь качественно отделяет от бензиновых в виду лучшего сохранения эксплуатационных свойств при низких температурах и более экономичного рабочего цикла.

Чтобы получить перечисленные плюсы требуется организация слаженной и качественной работы всех его составляющих.

Немаловажным процессом в работе двигателя является организация непосредственного впрыска топливовоздушной смеси в камеру сгорания. Осуществление этого процесса приходится на распылительную систему, которой является форсунка на электромагнитном управлении. Якорь форсунки ввиду воздействия магнитного поля втягивается с иглой в сопло и происходит впрыск топлива в камеру сгорания, с исчезновением тока магнитное поле ослабевает, и пружина возвращает иглу форсунки на седло.

Ключевой задачей является моделирование форсунки с электромагнитным управлением, удовлетворяющее конструкционные и производственные требования.

Практическая часть выполнялась в системе трёхмерного проектирования Solidwoks за основные элементы сборки были взяты: головка двухтактного двигателя NGH-35GT, форсунка, датчик, свеча зажигания, фитинг.

Первичной задачей являлось адаптация головки цилиндра двигателя под форсунку и датчик. Форсунка должна находиться в непосредственной близости со свечей зажигания.

На рис. 1 изображена головка цилиндра до изменения.

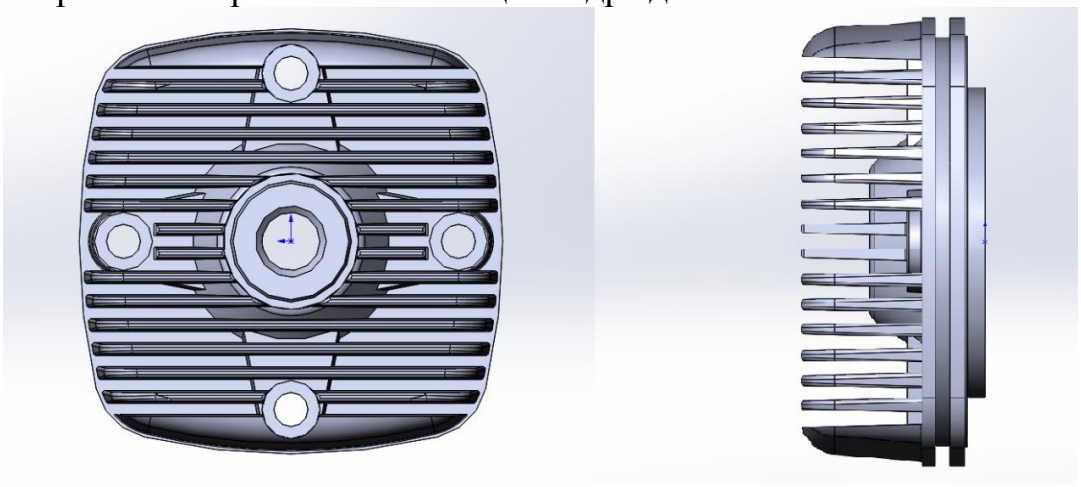


Рис. 9. Модель головки цилиндра до конструкторской модификации

На небольшой поверхности головки были сделаны отверстия под датчик свечу зажигания и форсунку. В виду последующего монтажа и сборки была отсечена часть охлаждающей решетки. На рис. 2 можно увидеть головку после модификации.

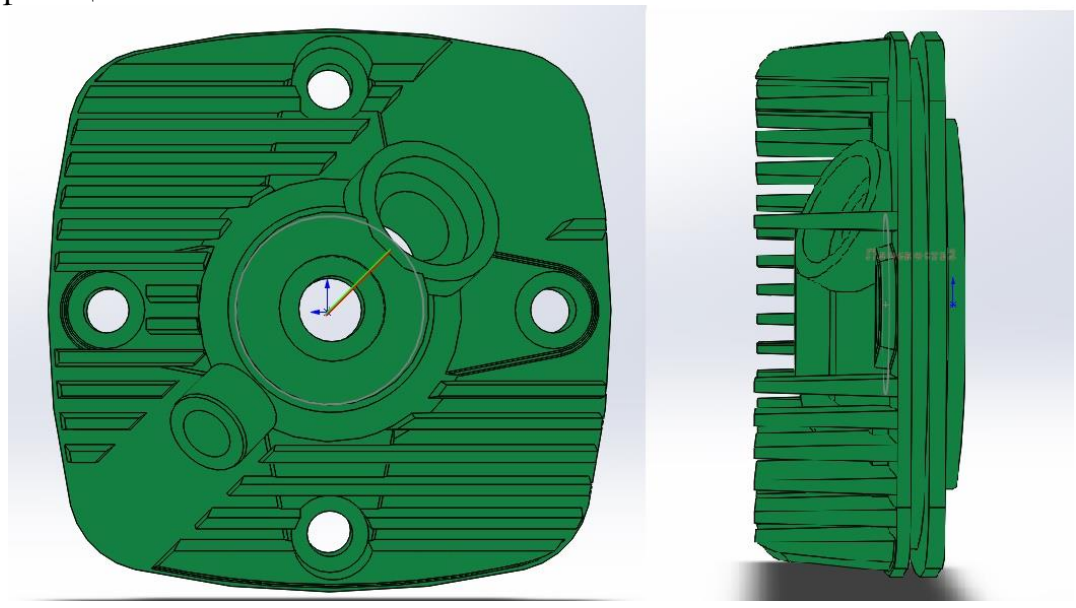


Рис. 2. Модель головки цилиндра после конструкторской модификации

Следующей задачей являлась моделирование и форсунки и ещё модификация под данный двигатель. За основу была взята форсунка для двигателя большей мощности, следовательно больших габаритов.

Форсунка на электромагнитном управлении до изменения представлена на рис. 3.

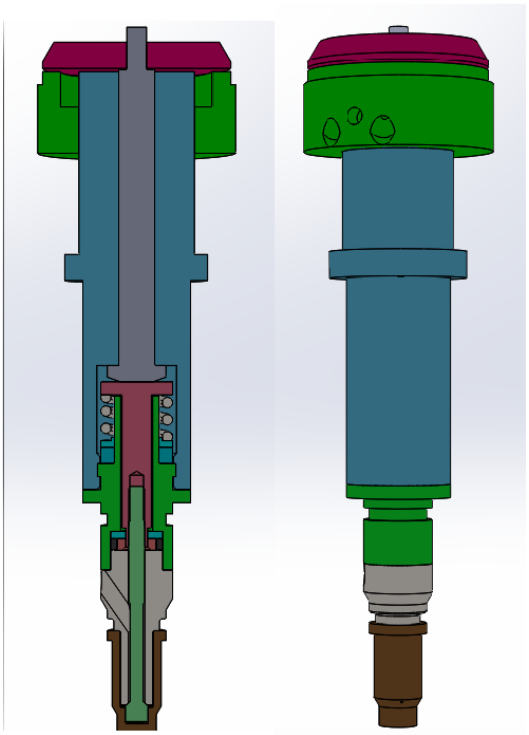


Рис. 3. Форсунка до конструкторской модификации

Основные изменения в форсунке произошли в габаритных размерах, удобные для монтажа, изменению подлежали следующие части: гайка форсунки, якорь, корпус для игры. Форсунка после изменений показана на рис. 4.

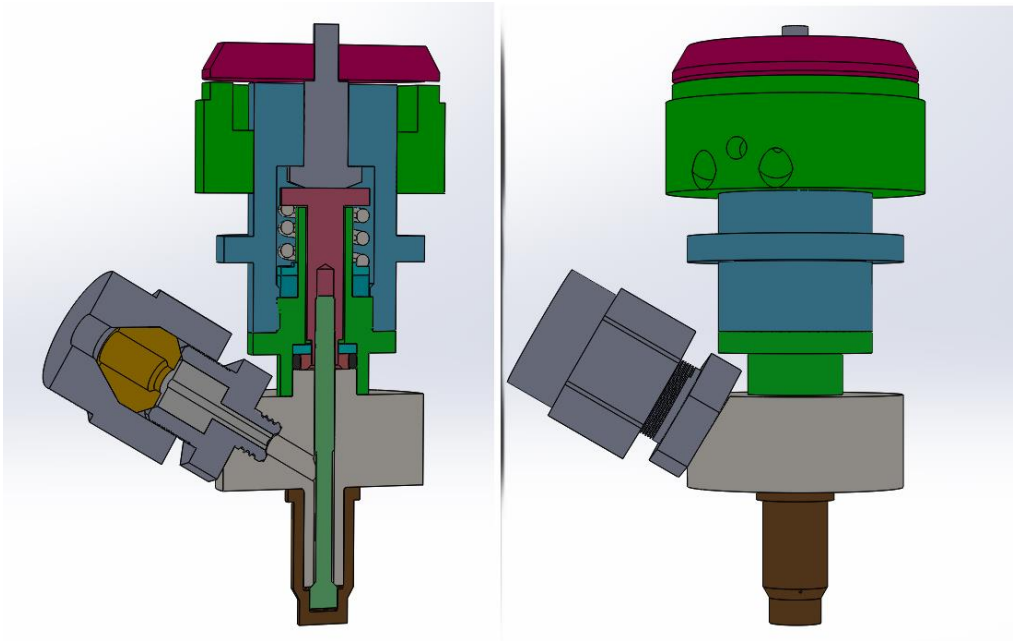


Рис. 4. Форсунка после конструкторской модификации

Последним этапом является компоновка всех частей конструкции в сборку и получения полноценной модели головки двигателя с распылителем на электромагнитном управлении. Таким образом мы получаем полноценную сборку показывающее расположения всех частей системы распыления, а также свечи зажигания и датчика.

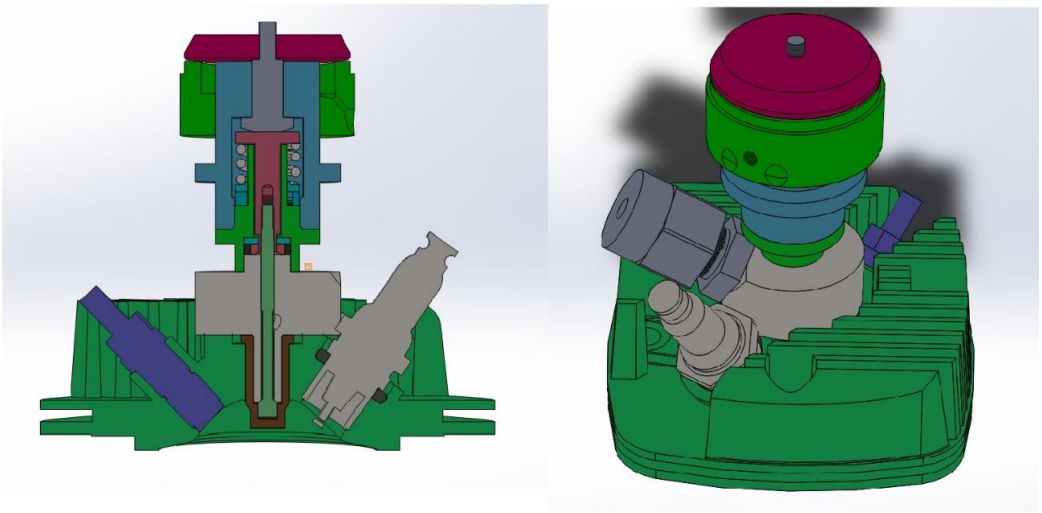


Рис. 5. Компоновка всех частей сборки головки двухтактного двигателя

Библиографический список

1. Работа двухтактного двигателя с унифицированным рабочим процессом на авиационном керосине М.Д. Гарипов, Р.Ю. Сакулин, Д.Р. Резванов. 2016. Т. 20, № 1. (71). С. 33–40

2. Еникеев Р. Д., Домбровский О.П., Резванов Д.Р. Двухтактный бензиновый двигатель с регулированием мощности методом изменения состава смеси // Двигателестроение. 2012. № 2. С. 19–24 [R.D. Enikeev, O.P. Dombrovsky and D.R. Rezvanov, “Power control in a Two-stroke Petrol engine by varying air/fuel ratio,” (in Russian), in Dvigatelestroyeniye, no. 2, pp. 19–24, 2012.]

© Некрасов П.Л., 2024

УДК 62-242.2

Ш.М. УСМАНОВ
4amil9@gmail.com
Науч. руковод. – доктор техн. наук, проф. Н.Ю. ДУДАРЕВА

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ПОРШНЕВОЙ-КАНАВКИ С КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Аннотация: в данной работе разработана математическая модель износа, которая учитывает параметры керамического покрытия, сформированного методом

микродугового оксидирования (МДО) и позволяет прогнозировать износ поверхностей поршневой канавки в условиях эксплуатации двигателя. Модель основывается на классическом уравнении износа и при этом учитывает важнейшие характеристики покрытия.
Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; износостойкость; поршневая канавка; микродуговое оксидирование

Технология «Микродуговое оксидирование» (МДО) активно используется для создания покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками. Одной из важнейших задач в области изучения износа деталей двигателей внутреннего сгорания является разработка математических моделей, способных прогнозировать износ компонентов с учетом свойств МДО-покрытия, условий эксплуатации и геометрических характеристик.

Наиболее нагруженной деталью двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является поршень. А наиболее изнашиваемым элементом поршня является поршневая канавка. Поэтому разработка математической модели, прогнозирующий износ поверхностей поршневой канавки с износостойкими керамическими покрытиями является актуальной задачей. Для создания такой модели необходимо сначала проанализировать факторы, влияющие на износостойкость поршневой канавки с учетом наличия на поверхности канавки МДО-покрытия. Были проанализированы и выбраны факторы, характеризующие условия работы поршня, свойства смазочного материала, а также параметры керамического МДО покрытия (рис. 1).

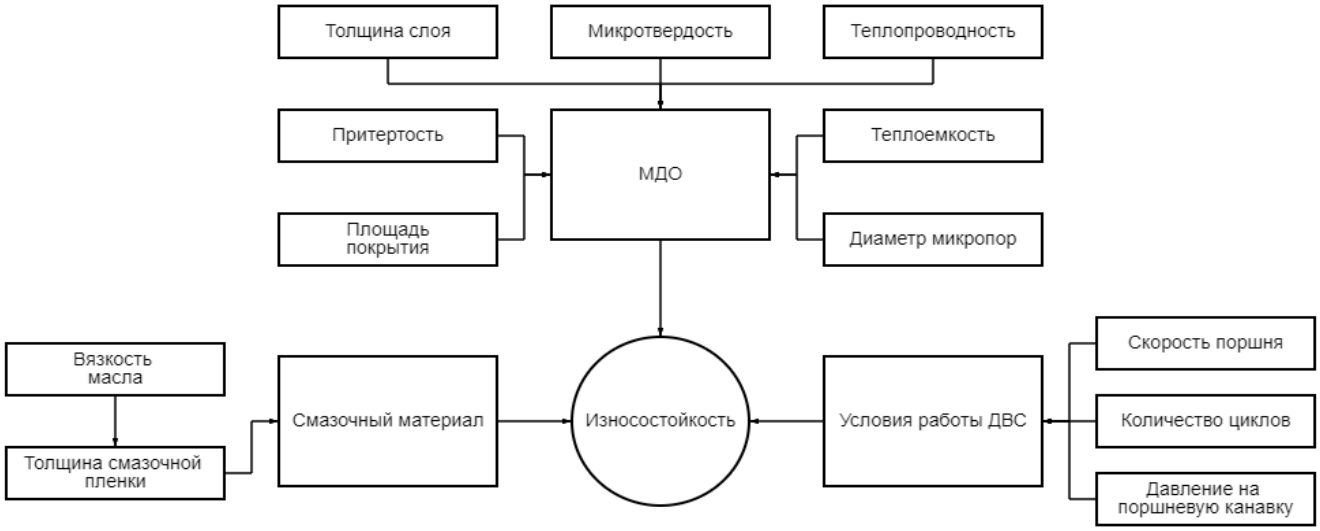


Рис. 1. Факторы, влияющие на износостойкость поршневой канавки

Для расчёта изнашивания были проанализированы основные математические модели, применяемые для расчетов интенсивности

изнашивания поверхностей. В зависимости от вида контакта применяются разные формулы расчета интенсивности изнашивания.

В качестве основы для математического моделирования была выбрана математическая модель изнашивания Крагельского И.В [4]. Она описывает изнашивание поверхности при контакте двух твердых тел, когда на поверхность действует механическое напряжение.

Для применения уравнения износа к поршневой канавке, необходимо учитывать особенности трения и изнашивания в этой конкретной паре трения. Для множественного контакта, который наблюдается на поверхностях поршневой канавки, использовали основное уравнение для расчета износа, *I*, мм [4, с. 87]:

$$I = K_1 \cdot \alpha \cdot h_r \cdot p_\text{г} \cdot \frac{1}{n},$$

где K_1– множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением неровностей; α – коэффициент перекрытия; h_r– характеристика шероховатости поверхности; $p_\text{г}$– давление; *n* – количество циклов двигателя.

Для применения данного уравнения при оценке интенсивности износа поршневой канавки, покрытой слоем МДО, были выполнены следующие этапы: 1) выявлены факторы, способствующие снижению интенсивности износа и продлению срока службы трущихся поверхностей; 2) определены факторы, увеличивающие интенсивность износа.

В качестве факторов, снижающих износ, выбраны:

1. *Площадь покрытия*. Керамическое покрытие может улучшать смазывающие свойства поверхности, уменьшая коэффициент трения и износ. Увеличенная площадь покрытия способствует более равномерному распределению смазки по поверхности.

2. *Теплоёмкость материала покрытия*. Материалы с высокой теплоёмкостью могут поглощать большое количество тепла, при этом не испытывая значительного повышения температуры. Это позволяет им эффективнее распределять тепло при трении или других механических воздействиях, предотвращая локальный перегрев.

3. *Теплопроводность*. Высокая теплопроводность ускоряет отвод тепла от области трения, что помогает поддерживать более низкую температуру в месте контакта. Это предотвращает перегрев и снижает риск термического повреждения поверхностей, например, размягчения или образования оксидных плёнок, которые могут способствовать ускоренному износу. Также высокая теплопроводность не позволяет снижаться вязкости у смазочного материала, что предотвращает его вытекание из зон трения.

4. *Микротвёрдость*. Материалы с высокой микротвёрдостью более устойчивы к вмятинам и царапинам при воздействии нагрузок, что снижает вероятность образования дефектов, приводящих к износу [3, с. 22].

5. *Толщина слоя.* Чем больше слой покрытия, тем больше требуется времени, для его износа, тем выше долговечность покрытий.

6. *Диаметр микропор.* Микропоры способны задерживать в себе смазочный материал, выступая в роли «смазочных карманов», тем самым уменьшая трение и износ между контактирующими поверхностями.

7. *Толщина смазочного материала.* Смазочный материал позволяет лучше отводить тепло и продукты износа от контактирующих поверхностей, а также позволяет сменить характер трения с сухого на полужидкостный или жидкостный. Чем больше толщина смазочного материала, тем больше усилий требуется для разрыва масляной пленки.

8. *Пористость покрытия,* вместе с диаметром микропор, позволяет смазочному материалу оставаться на поверхности покрытия и выполнять функцию смачиваемости смазочным материалом.

В качестве факторов, увеличивающие износ, выбраны:

1. *Коэффициент перекрытия* α. Его значение определяется площадью контакта между поверхностями трения:

$$\alpha = \frac{A_r}{A_a};$$

где A_a – номинальная площадь контакта, A_r – действительная площадь контакта [5, с 87].

Более высокое значение коэффициента перекрытия указывает на большую площадь контакта, что может значительно повлиять на распределение нагрузок и, следовательно, на износ.

2. *Шероховатость поверхности.* Этот показатель определяется исходя из микрогеометрии контактирующих поверхностей. В модели И.В. Крагельского шероховатость поверхности прямо пропорционально влияет на интенсивность износа [5, с 95].

3. *Количество циклов.* Большее количество циклов приводит к большему износу пар трения.

В итоге, основное уравнение износа поршневой канавки, с МДО покрытием, с учетом выше перечисленных факторов, принимает следующий вид:

$$I = K_1 \frac{\alpha \cdot h_r \cdot p_г \cdot \rho}{S \cdot h \cdot H_\mu \cdot C \cdot \lambda \cdot d_{м.п.} h_{с.м.}} n^{-1}$$

где K_1 – множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением неровностей; ρ – пористость МДО-слоя, %; S – площадь покрытия, мкм^2; h – толщина слоя, мкм; H_μ – микротвердость, ГПа; λ –

теплопроводность, Вт/(мкм·К); C – теплоемкость, Дж/К; $d_{м.п.}$ – диаметр микропор, нм.

Разработанная модель позволяет прогнозировать износ деталей с учетом функциональных параметров покрытия.

Библиографический список

1. Загайко С.А. Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: учебное пособие / С.А. Загайко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 123 с.
2. Мусин Н.Х. «Повышение износостойкости и снижение механических потерь двигателя внутреннего сгорания посредством искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности цилиндра»
3. Дударева Н.Ю. Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость гильзы цилиндра ДВС из алюминиевого сплава / Н.Ю. Дударева, Р.В. Кальщиков, Н.Х. Мусин, Д.А. Рябова // Вестник ИрГТУ. 2013. № 9 (80). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-mikrodugovogo-oksidirovaniya-na-iznosostoykost-gilzy-tsilindra-dvs-iz-alyuminievogo-splava
(дата обращения: 23.10.2024).
4. Загайко С.А. Математическое моделирование изнашивания деталей ЦПГ ДВС // Вестник УГАТУ, 2013. Т. 17, № 3, (56). С. 231–238. URL: http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/1611/1467.
5. Крагельский И.В., Алисин В.В. Трение изнашивание и смазка: справочник 1 книга./ Крагельский И.В., Алисин В.В. – 1978. – 91 с.

©Усманов Ш.М., 2024

УДК 62-242.2

Д.В. ХАСАНОВ
khasanovmailbox@mail.ru
Науч. руководв. – докт.техн.наук, профессор Н.Ю. ДУДАРЕВА

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА МДО-СЛОЯ НА ЮБКЕ ПОРШНЯ

Аннотация: в представленной работе разработана математическая модель изнашивания с учётом параметров микродугового оксидирования (МДО) для прогнозирования поведения юбки поршня в условиях эксплуатации. Модель основывается на уравнении износа, учитывающем ключевые свойства покрытия.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; износостойкость; юбка поршня; микродуговое оксидирование.

Одним из способов повышения износостойкости алюминиевых сплавов, используемых в деталях цилиндропоршневой группы (ЦПГ), является микродуговое оксидирование (МДО), создающее многослойные покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками [1-3]. Одной из ключевых задач в области изучения износа деталей ЦПГ двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является разработка математических моделей, которые позволят прогнозировать износ деталей с учетом свойств МДО-покрытия, режимов эксплуатации и геометрических параметров. Чтобы разработать такую модель для начала нужно произвести анализ факторов, влияющих на износостойкость юбки поршня с учётом свойств МДО покрытия (Рисунок 1).

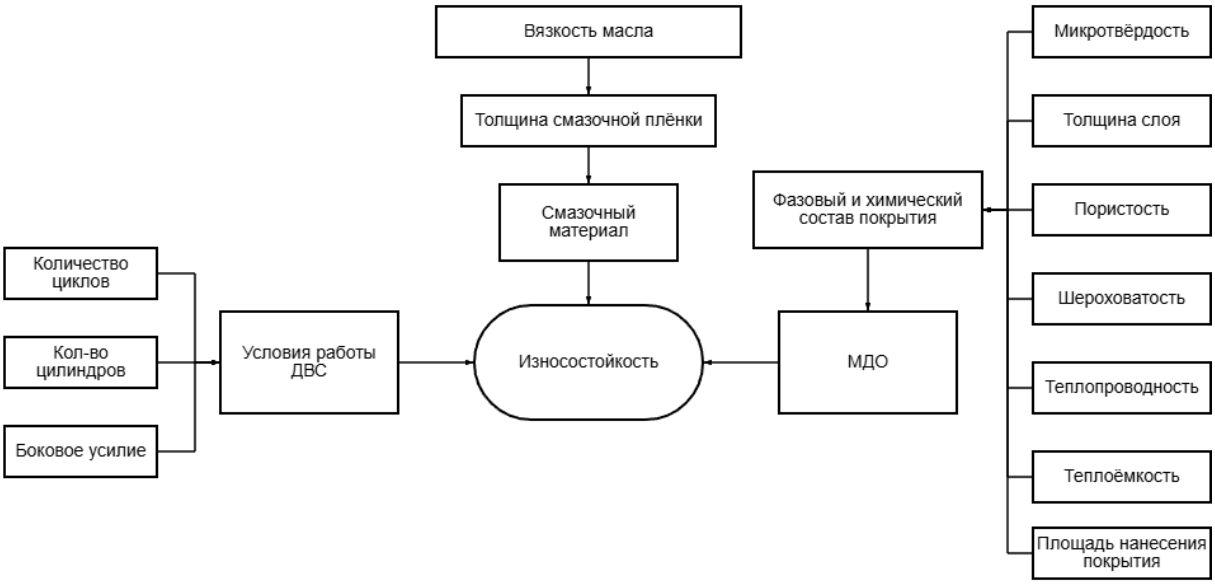


Рис. 1. Факторы, влияющие на износостойкость юбки поршня с учётом свойств МДО покрытия

В качестве основы для математического моделирования была выбрана математическая модель изнашивания Крагельского И.В [4, с 84]. Она описывает изнашивание поверхности при контакте двух твердых тел, когда на поверхность действует механическое напряжение. Модель включает в себя уравнения, описывающие физические процессы в контакте двух тел, такие как деформации, напряжения, температуры и скорости, а также свойства материалов, такие как модуль упругости, твердости, коэффициент трения и другие.

Для расчёта изнашивания были проанализированы основные формулы, применяемые для расчетов интенсивности изнашивания поверхностей. В зависимости от вида контакта могут применять разные формулы для расчета интенсивности изнашивания.

Для множественного контакта, который наблюдается на юбке поршня, использовали основное уравнение для расчета износа, *I*, мм [4, с 87]:

$$I = K_1 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{h}{r}} \cdot \frac{p_a}{p_r} \cdot \frac{1}{n},$$

где K_1 – множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхностях твёрдых тел, α – коэффициент перекрытия; *h* – глубина внедрения; *r* – радиус микронеровности; p_a – номинальное давление на контакте Па; p_r – фактическое давление на контакте Па; *n* – число циклов нагружения, приводящее к отделению объема материала от поверхностного слоя.

Для применения этого уравнения к оценке интенсивности изнашивания юбки поршня, покрытой МДО слоем, были выполнены следующие шаги: 1) определили факторы, снижающие интенсивность изнашивания и увеличивающие срок службы трущихся поверхностей; 2) определили факторы, увеличивающие интенсивность изнашивания.

В качестве факторов, снижающих износ, были выбраны:

1. *Площадь покрытия S, мкм*^{2}. Керамическое покрытие может улучшать смазывающие свойства поверхности, уменьшая коэффициент трения и, следовательно, износ. Большая площадь покрытия способствует более эффективному распределению смазки по поверхности.

2. *Толщина слоя h, мкм.* Более толстый слой покрытия медленнее изнашивается, так как нужно больше времени для износа покрытия до уровня основного материала (подложки).

3. *Микротвёрдость* H_μ*, ГПа.* Материалы с высокой микротвёрдостью менее подвержены вмятинам и царапинам под воздействием нагрузок, что снижает вероятность появления дефектов, ведущих к изнашиванию [5, с. 22].

4. Теплоёмкость С, Дж/К. Материалы с высокой теплоёмкостью способны поглощать больше тепла без значительного повышения температуры. Это означает, что при трении или других формах механического воздействия они могут лучше распределять тепло, предотвращая локальное перегревание.

5. Теплопроводность λ*, Вт/(м·К).* Высокая теплопроводность способствует быстрому отводу тепла от зоны трения. Это помогает поддерживать более низкую температуру в зоне контакта, предотвращая перегрев и снижая риск термического повреждения поверхностей, таких как размягчение или образование оксидных пленок, которые могут ускорить износ.

6. *Диаметр микропор* $d_{\text{м.п.}}$*, нм.* Микропоры могут действовать как резервуары для смазочных материалов, что улучшает смазку контактных поверхностей и снижает трение и износ. Оптимальный диаметр пор обеспечивает удержание достаточного количества смазки без риска её утечки.

7. *Пористость ρ, %* МДО-слоя положительно сказывается на износостойкости, если поры выполняют функцию смазочных резервуаров и величина пористости находится в оптимальных пределах.

К факторам, которые отрицательно влияют на износ, т.е. увеличивают интенсивность изнашивания, были отнесены:

1. Коэффициент перекрытия α. Его значение определяется площадью контакта между поверхностями трения:

$$\alpha = \frac{A_r}{A_a};$$

где A_a – номинальная площадь контакта, A_r – действительная площадь контакта.

Более высокое значение коэффициента перекрытия указывает на большую площадь контакта, что может значительно повлиять на распределение нагрузок и, следовательно, на износ.

2. Шероховатость поверхности h_r**.** Этот показатель определяется исходя из микрогеометрии контактирующих поверхностей. В модели И.В. Крагельского шероховатость поверхности значительно влияет на интенсивность износа. [4, с. 95]

3. *Количество циклов n* оказывает значительное влияние на износ, и эта зависимость может быть описана линейной или нелинейной функцией. Для минимизации износа важно обеспечивать стабильные условия смазки, правильный температурный режим и снижение поверхностных напряжений в паре трения.

Основываясь на описанных выше факторах, было разработано основное уравнение износа с применением МДО покрытия:

$$I = K_1 \frac{\alpha \cdot h_r \cdot p_г \cdot n}{\rho \cdot h_{см} \cdot S \cdot h \cdot H_\mu \cdot C \cdot \lambda \cdot d_{м.п.}}$$

где ρ – пористость МДО-слоя %; S – площадь нанесения покрытия, мкм^2; h – толщина слоя МДО-покрытия, мкм; H_μ – микротвердость, ГПа; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); C – теплоемкость, Дж/К; $d_{м.п.}$ – диаметр микропор, нм; $p_г$ – давление рабочих газов МПа; $h_{см}$ – толщина смазочной плёнки, мкм; K_1– множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением неровностей.

Разработанная модель позволяет прогнозировать износ деталей с учетом функциональных параметров покрытия.

Библиографический список

1. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление: монография / Е.В. Парфенов, Р.Р. Невьянцева, С.А. Горбатков, А.Л. Ерохин. – М.: Машиностроение, 2014. – 380 с.
2. Б.В. Шандров, Е.М. Морозов, А.В. Жуковский Основы технологии микродугового оксидирования: Учебное пособие. – М.: «ИД Альянс», 2008 – 80 с.
3. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
4. Крагельский И.В., Алисин В.В. Трение изнашивание и смазка: справочник 1 книга. / Крагельский И.В., Алисин В.В. – 1978. – 91 с.
5. Дударева Н.Ю. Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость гильзы цилиндра ДВС из алюминиевого сплава / Н.Ю. Дударева, Р.В. Кальщиков, Н.Х. Мусин, Д.А. Рябова // Вестник ИрГТУ. 2013. № 9 (80). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-mikrodugovogo-oksidirovaniya-na-iznosostoykost-gilzy-tsilindra-dvs-iz-alyuminievogo-splava (дата обращения: 05.11.2024).

© Хасанов Д.В., 2024

УДК 621.432.3

Р.Р. ШАКИРЬЯНОВ
nice.shakiryanov@mail.ru
Науч. руководов. – доктор техн. наук, профессор. Н.Ю. Дударева

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МДО ПОКРЫТИЯ

Аннотация: в данной статье приведены результаты исследования влияния пор на теплопроводность керамического покрытия, полученного при помощи МДО. Выявлено, что на теплопроводность покрытия влияет размер и количество пор.
Ключевые слова: микродуговое оксидирование, пористость, термостойкое покрытие, теплонапряжённость.

В ДВС широко используются различные покрытия, например молекулярные твердые покрытия, керамические и антифрикционные покрытия (как дисульфид молибдена) [1,2]. Эти покрытия снижают износ, тепловую напряженность деталей.

Широкое распространение приобрели теплозащитные покрытия на основе керамики, к ней обычно относят соединения из оксидов металлов и не только [3].

В основном наносят керамическое покрытие на днище поршня, чтобы поршень не нагревался. Так как керамическое покрытие поглощает тепло и таким образом нанесение такого покрытия уменьшает теплонапряженность детали [4].

Одним из таких покрытий является покрытия, получаемые микродуговым оксидированием (МДО).

Достоинства: высокая износостойкость покрытия; нет необходимости в специальной обработке поверхности из-за нанесения покрытия электрическим разрядом; экологичность за счет ненадобности специальной обработки, т.е. очистных сооружений; возможность нанесения покрытия до 400 мкм.

Недостатки: сложность получения равномерных покрытий; повышенная энергоемкость [4,5].

Этот метод нанесения покрытий является перспективным и имеет широкое применение. Из-за особенностей получения МДО покрытия в них всегда возникают полости, которые влияют на свойства покрытия, например на коррозионную стойкость, электроизоляционные и другие [6]. Поэтому изучение влияния пор на теплопроводность покрытия имеет большое значение.

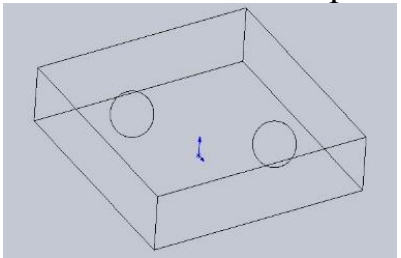
Целью работы является исследование влияния полостей на теплопроводность керамического покрытия, полученного при помощи МДО.

Исследование влияния полости на теплопроводность покрытия проводилось в Solidworks Simulation.

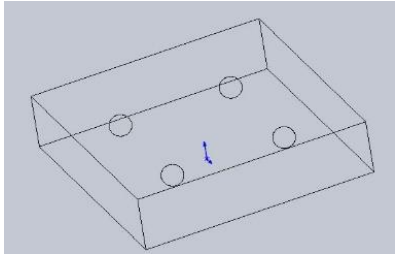
Для того чтобы понять как именно наличие полости влияет на теплопроводность было проведено два исследования, а именно теплопередача через покрытие с постоянным объемом занимаемого полостями и теплопередача через покрытие с неизменным радиусом полостей.

В первом исследовании проводилось 3 опыта: покрытие с двумя полостями, покрытие с четырьмя полостями и покрытие с шестью полостями. Объем, занимаемый полостями, должен быть равен 10% от объема покрытия.

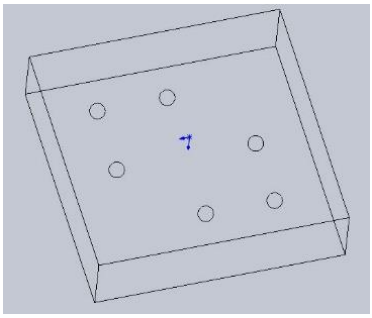
Исследование проводилось приложением теплового потока, который был равен 5000 Вт/м^2, к верней части первой пластины, представлявшей собой покрытие, которое соприкасалось со второй пластиной, имитировавший собой головку поршня. Пластины имели размеры 40х40 мм и высоту 10 мм.



а)



б)



в)

Рис. 1. Покрытия с полостями: а) с двумя; б) с четырьмя;
в) с шестью

Полости из себя представляли сферы с радиусами 3,628 мм для опыта с 2 полостями (рис 1, а), 1,814 мм для опыта с 4 полостями (рис. 1, б) и 1,209 мм для опыта с 6 полостями (рис. 1, в).

Покрытие керамическое с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{покр}$ = 1,5 Вт/(м*К), а головка поршня из алюминиевого сплава 4032-Т6 с коэффициентом теплопроводности λ = 138 Вт/(м*К).

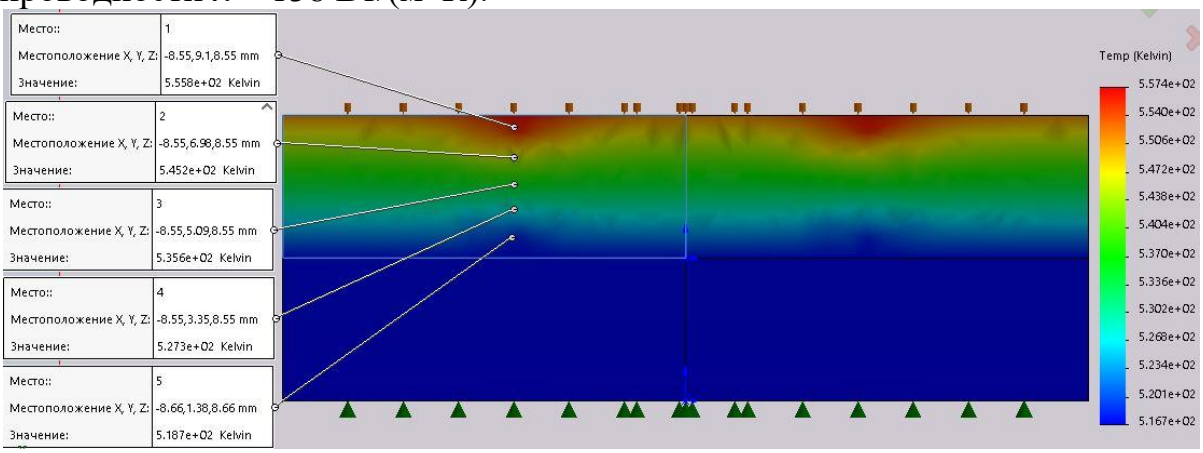


Рис. 2. Покрытие с двумя полостями

Температуры снимались по 5 точкам в месте расположения полости, как показано на рис. 2, и сравнивались с температурами при отсутствии полости.

Результаты расчетов были приведены на одной диаграмме (рис. 3).

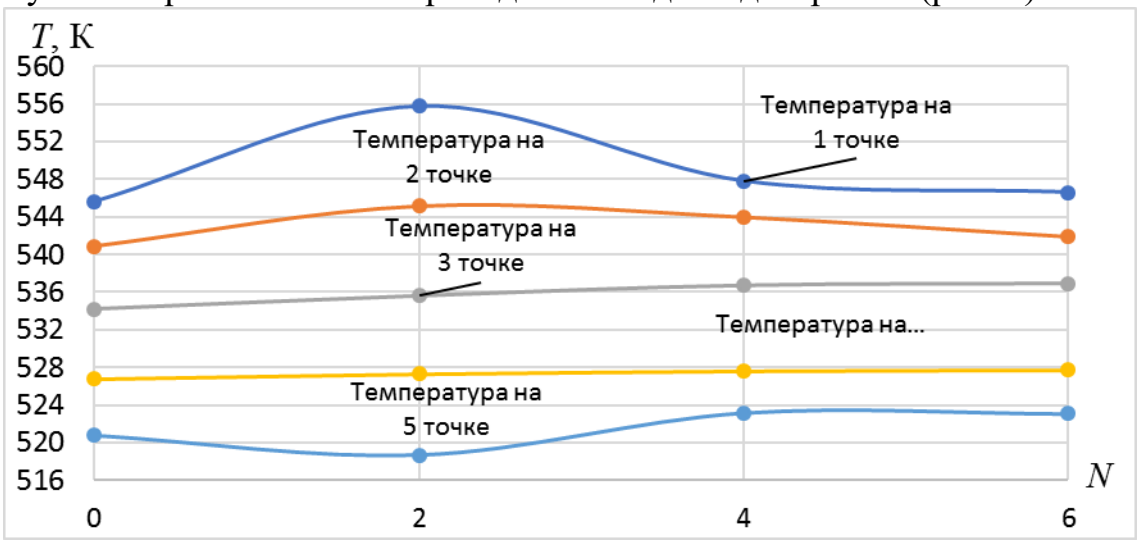


Рис. 3. Зависимость температуры в покрытии от количества полостей

По диаграмме видно, что больше всех повлияло на изменение температуры добавление 2 полостей (температура в верхней 1 точке увеличилась на 10 Кельвин, а в нижней 5 точке напротив уменьшилась на 2 Кельвина), а при добавлении 6 полостей температуры не значительно изменились в сравнении с покрытием без полостей (температура в точке 1 изменилась на 3 Кельвина, в 5 точке на 2 Кельвина).

По итогам первого исследования стало понятно, что полости увеличивают температуру покрытия при условии, что они имеют большой радиус, а при уменьшении радиуса и увеличении количества полостей температура также увеличивается, по сравнению с покрытием без полостей, но не так значительно, как с полостями с большим радиусом.

Второе исследование проводилось с целью изучения того, как будут влиять полости на теплопроводность при их практически неизменном радиусе, но при изменении объема полостей и их количества.

Исследование проводилось с двумя видами полостей с крупными, которые имели больший радиус, и маленькими, с меньшим радиусом. Количество, радиус и объем занимаемого полостями можно увидеть в табл.1

Таблица 1

Размеры и количество полостей

V, %	*V*, мм^3	Крупные полости		Маленькие полости	
		R, мм	*N*	*R*, мм	*N*
5	800	1,1518	5	0,5759	10
9	1440	1,1675	6	0,5838	12
14	2240	1,1595	7	0,5798	14
21	3360	1,1614	8	0,5807	16
30	4800	1,1627	9	0,5814	18

Как и в первом исследовании тепловой поток равный 5000 Вт/м^2 прикладывался к верхней части первой пластины, представлявшей собой покрытие, а вторая пластина, имитировавшая головку поршня, примыкала к первой пластине снизу. Температура также снималась в 5 точках, но они располагались в центре первой пластины.

Было проведено 5 опытов для каждого вида полостей.

Результаты расчетов также были приведены на диаграммах, а именно для крупных полостей на рис. 4 и для маленьких полостей на рис. 5.

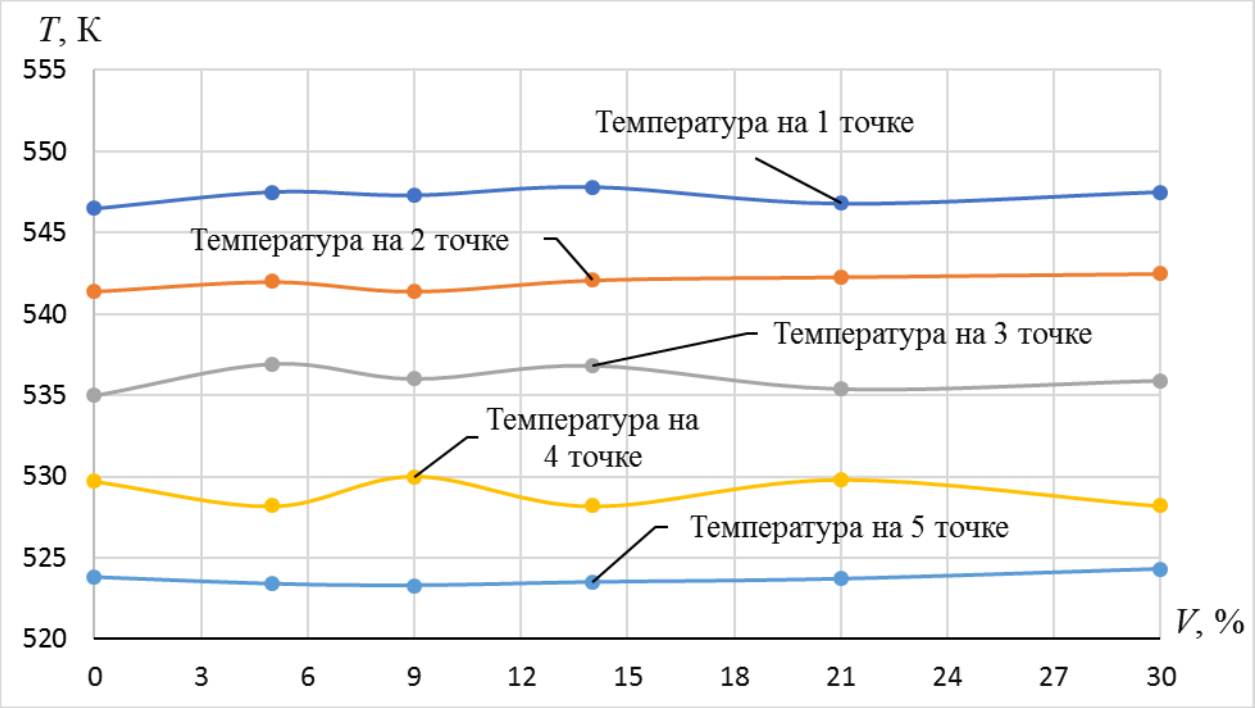


Рис. 4. Зависимость температуры в покрытии от объема полостей с крупными полостями

Как видно из расчетов с крупными полостями на рис. 3 температура держится примерно на одном уровне слегка отличаясь друг от друга.

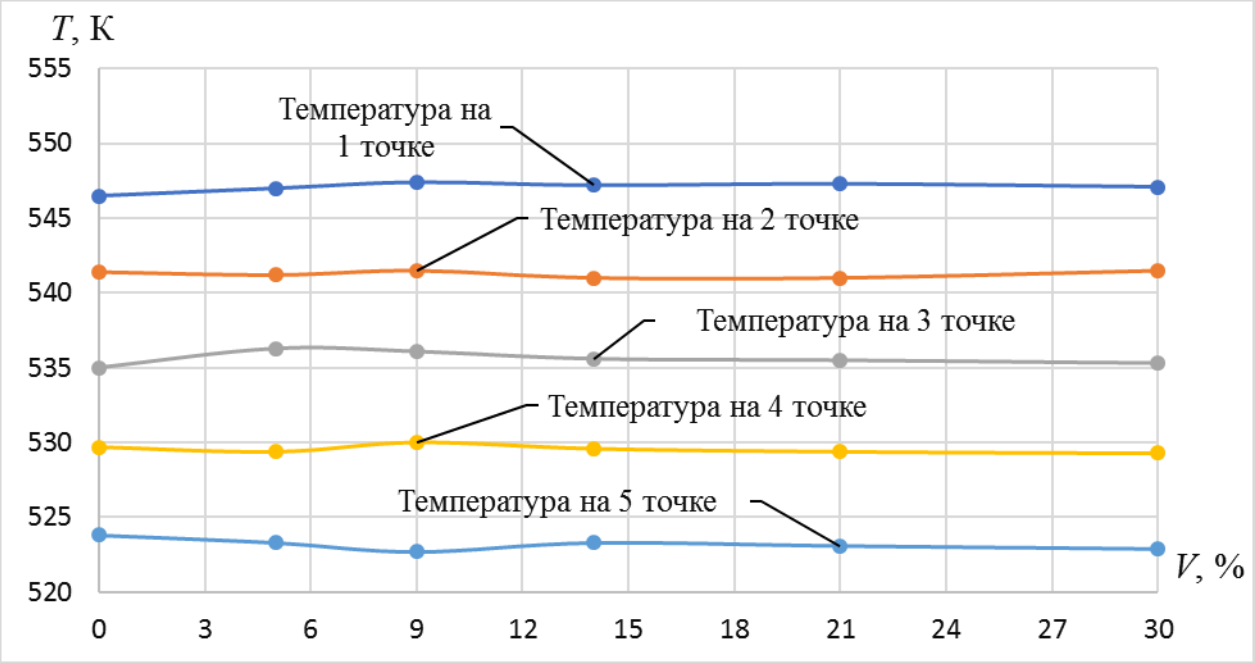


Рис. 5. Зависимость температуры в покрытии от объема полостей с маленькими полостями

Из расчетов с маленькими полостями на рис. 4 видно, что температура с ростом объема и количества полостей не изменяется хоть и выше в сравнении с покрытием без полостей.

Таким образом было проведено исследование влияния полости на теплопроводность покрытия. Выявлено, что наличие полостей в покрытие

влияет на теплопроводность покрытия, так как температура в покрытие с полостями увеличивается, но влияние полостей на теплопроводность различается при разных размерах и количестве полостей. Наибольшее влияние на рост температуры в покрытии оказывает радиус полостей.

Библиографический список

1. Бутусов И.А., Дударева Н.Ю. Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость поршня ДВС // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. №09. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-mikrodugovogo-oksidirovaniya-na-iznosostoykost-porshnya-dvs (дата обращения: 15.11.2024).
2. Цветков Ю.Н. Повышение эффективности дизелей нанесением на поршни твердого смазочного покрытия, содержащего дисульфид молибдена / Ю.Н. Цветков, В.М. Тарасов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2010. № 1 (5). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-dizeley-naneseniem-na-porshni-tverdogo-smazochnogo-pokrytiya-soderzhaschego-disulfid-molibden (дата обращения: 15.11.2024).
3. Виноградов А.М. Материалы, использующиеся в методе плазменного напыления // Проблемы Науки. 2015. № 5 (35). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/materialy-ispolzuyuschiesya-v-metode-plazmennogo-napyleniya (дата обращения: 15.11.2024).
4. Дударева Н.Ю. Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость гильзы цилиндра ДВС из алюминиевого сплава / Н.Ю. Дударева, Р.В. Кальщиков, Н.Х. Мусин, Д.А. Рябова // Вестник ИрГТУ. 2013. № 9 (80). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-mikrodugovogo-oksidirovaniya-na-iznosostoykost-gilzy-tsilindra-dvs-iz-alyuminievogo-splava (дата обращения: 15.11.2024).
5. Василюк К.В. Совершенствование технологии деталей поршневой группы ДВС // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. № 13. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-tehnologii-detaley-porshnevoy-gruppy-dvs (дата обращения: 15.11.2024).
6. Трушкина Т.В., Гирн А.В., Раводина Д.В., Алякрецкий Р.В. Влияние технологических параметров на пористость МДО-покрытий // Решетневские чтения. 2014. № 18. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tehnologicheskih-parametrov-na-poristost-mdo-pokrytiy (дата обращения: 15.11.2024).

© Шакирьянов Р.Р., 2024

УДК 621.43.056

Л.А. ШАНГАРЕЕВ
ufa.rb.linar2003@gmail.com
Науч. руковод. – доктор техн. наук, проф. Н.Ю. ДУДАРЕВА

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВС

Аннотация: в статье исследуется зависимость толщины МДО-слоя, сформированного на поверхности поршня, на температуру деталей камеры сгорания двигателя внутреннего сгорания.
Ключевые слова: теплопроводность, МДО, поршень, алюминий, покрытие, ДВС, микродуговое оксидирование.

Покрытие поршней в двигателях внутреннего сгорания является ключевым фактором для обеспечения надежности работы деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1]. Оно снижает трение, увеличивает срок службы, улучшает теплоотвод, уменьшает расход масла и улучшает сжатие [2]. В процессе сгорания топлива выделяется много тепла, часть из которого уходит через поршень и другие детали ДВС. Керамические покрытия помогают перераспределить температуры, защищая детали от прогара [3]. Однако исследований, посвященных влиянию керамических покрытий на тепловое состояние деталей ДВС, проведено недостаточно. Поэтому была сформулирована цель работы – исследовать зависимость температуры на поршне, гильзе и головке цилиндра ДВС от толщины керамического покрытия на днище поршня.

Методика

Исследование проводилось в программе SolidWorks Simulation [4]. Температурные нагрузки (температура и коэффициент теплоотдачи) прикладывались к поверхностям по схеме указанной на Рис. 1. Значение T и α указаны в Табл. 1. Значения температур (T) и коэффициентов теплоотдачи (α) были взяты из работ [5, 6].

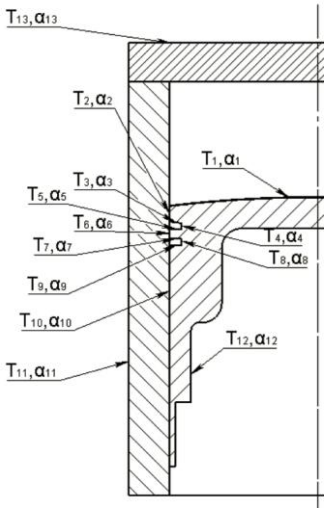


Рис. 1. Схема приложения температурных нагрузок

Таблица 4.

Значения температурных нагрузок [5, 6]

№	T, K	α, Вт/(м^2·K)	№	T, K	α, Вт/(м^2·K)	№	T, K	α, Вт/(м^2·K)
1	141	592	6	423	148	11	323	1805
2	1413	148	7	423	97	12	363	174
3	573	97	8	423	1818	13	298	2330
4	573	1818	9	423	11609			
5	573	11609	10	473	1485			

Перед проведением расчётов на деталях сборки была построена сетка конечных элементов (Рис. 2.).



Рис. 2. Сборка деталей с сеткой конечных элементов

Работы проводились с поршнем без покрытия и с покрытиями толщиной 100, 200, 300, 400 мкм. Температура определялась методом зондирования в точках, схема расположения которых показана на Рис. 3.

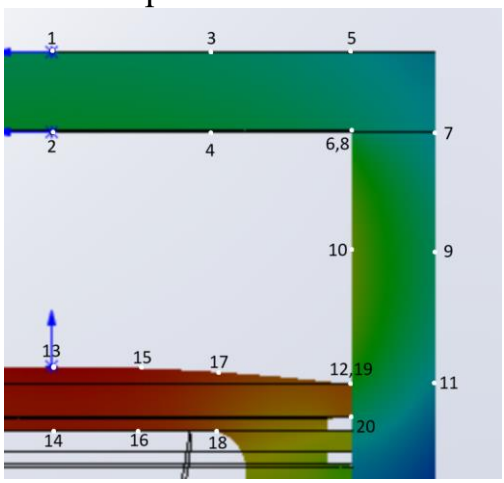


Рис. 3. Схема расположения точек зондирования температур

Результаты

Были построены графики изменения температуры в деталях ДВС от толщины МДО покрытия. Были проанализированы температуры в 4-х точках, в которых изменение температуры наиболее заметно (T11, T12, T13 и T14). Точка T11 и T12 принадлежат гильзе, точка T13 располагается на поверхности днища поршня (в центре), точка T14 расположена на поверхности поршня, со стороны картера. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

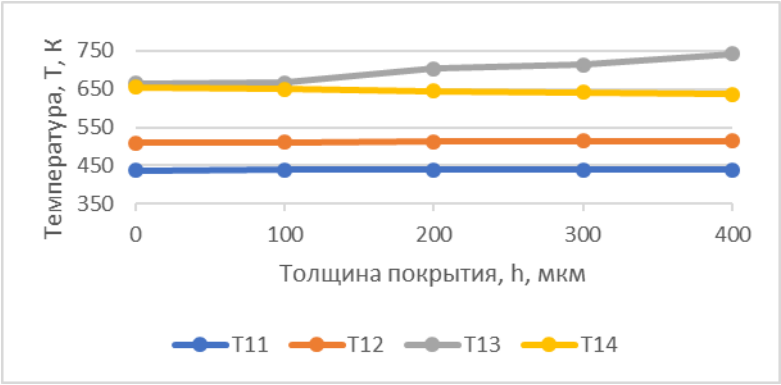


Рис. 4. Зависимость температуры гильзы от толщины МДО покрытия на днище поршня

Заключение

По полученным данным (Рис. 4.) видно, что при увеличении толщины МДО покрытия температура на стенке гильзы с обоих сторон немного растёт, на самом покрытии оно значительно увеличивается, но под поршнем температура уменьшается. Из этого следует что керамическое покрытие днища является эффективным средством снижения тепловой напряжённости поршней ДВС.

Библиографический список

1. *Mechalikh M., Benhammou A., Zidane I., Bettahar A.* Study of piston thermo-elastic behaviour under thermomechanical solicitations // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. 2019. Vol. 16, N 4. P. 7287-7298.

2. Никитин М.Д., Кулик А.Я., Захаров Н.И. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизеля: учебник. Л.: Машиностроение, 1977. 168 с.

3. Орлов М.Ю., Лукачёв С.В., Матвеев С.Г. Моделирование процессов в камере сгорания: учебное пособие. С.: Издательство Самарского университета, 2017. – 292 с.

4. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с

5. Musin N., Dudareva N. Investigation of the effect of the coating formed by microarc oxidation on the piston top on the thermal state of the internal combustion engine parts // MATEC Web of Conferences. 2018. N 224. P. 03008. doi:10.1051/matecconf/201822403008.

6. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А., Краснокутский А.Н., Мягков Л.Л. Конструирование двигателей внутреннего сгорания: учебник. М.: Машиностроение, 2008. – 496 с.

© Шангареев Л.А., 2024

СЕКЦИЯ 1.5. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

УДК 521

И.А. ГАЙНАНОВ
Ilyas.gnov@mail.ru
Науч.руководов. – канд. техн. наук, доц. И.В. ПУЧКОВА

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СЕАНСОВ СВЯЗИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С НАЗЕМНОЙ СТАНЦИЕЙ

Аннотация: в данной статье рассмотрена теория расчета орбиты космического аппарата, проведено моделирование сеансов связи космического аппарата с приемной станцией в программном комплексе *General Mission Analysis Tool (GMAT)*. Проведены теоретические расчеты параметров орбиты, таких как: период обращения, наклонение, долгота восходящего узла, истинная аномалия. Было проведено моделирование сеансов связи в программе GMAT.
Ключевые слова: GMAT; сеансы связи; начальный угол поворота Земли, моделирование орбит, оптимизация параметров орбиты.

Для непрерывного функционирования космического аппарата (КА) требуется постоянное обслуживание оператора. Передача данных возможна только в зонах радиовидимости КА и наземной станции. Следовательно, проблема создания орбиты с наибольшим количеством сеансов связи (оптимизация орбиты) с КА стоит остро.

В настоящее время с развитием компьютерных и вычислительных технологий автоматизированные системы находят все большее применение для оптимизации орбит КА. Автоматизированные системы обеспечивают большую точность вычислений, экономя время и уменьшая затраты на расчеты. *General Mission Analysis Tool (GMAT)* – программное обеспечение для создания и оптимизации космической миссии в любой точке Солнечной Системы, в том числе на околоземной орбите. В предлагаемой статье рассматривается постановка задачи о построении коммуникационной среды для передачи данных от космического аппарата на наземную станцию приема и обработки информации с помощью автоматизированной системы GMAT.

Космический аппарат может быть размещен на произвольной орбите вокруг Земли 1 декабря 2024 года в 12:00 по UTC. Задать параметры орбиты так, чтобы организовать сеанс радиосвязи с 1-2 декабря 2024 с городом Уфа. Координаты города Уфа: $\varphi = 54.735152°$ по широте, $\lambda = 55.958722°$ по долготе.

Первым шагом в решении поставленной задачи послужит расчет орбиты космического аппарата. При расчете будем считать, что отсутствует влияние атмосферы на движение космического аппарата.

Для расчета используем Низкую Околоземную Орбиту (НОО), которая является типичной для большинства спутников. Орбита малых космических аппаратов находится на высоте примерно 400 км над уровнем Земли. Будем работать с идеально круглой орбитой, примем эксцентриситет $e = 0$. Так как эксцентриситет равен нулю, орбита представляет собой окружность, радиус которой:

$$R = R_з + h \quad (1)$$

где $R_з$ – радиус Земли ($R_з = 6371$ км); h – высота космического аппарата над поверхностью Земли ($h = 400$ км). Получим $R = 6771$ км.

Выразим уравнение периода обращения КА (3) из следующего уравнения:

$$R = \sqrt[3]{\mu(\frac{T}{2\pi})^2} \quad (2)$$

где μ – гравитационный параметр.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{\mu}} = 5542 \text{ с} \quad (3)$$

Определим угол между плоскостью орбиты и плоскостью земного экватора, это значение называется наклонением орбиты i. Наклонение орбиты не должно быть меньше, чем широта города: $i = 54{,}735152\,°$.

Определим начальный угол поворота Земли:

$$\theta(T_U) = 2\pi(0{,}779057273264 + 1{,}00273781191135448 \cdot T_U) \quad (4),$$

где T_U – Юлианская дата (для 12:00 UTC 1 декабря 2024 года соответствует 2460646 Юлианских дней).

Проведя расчет (4), получаем: $\theta(T_U) = 203{,}395\,°$.

Для определения долготы восходящего узла прибавим начальный угол поворота Земли и долготу города Уфа.

$$\Omega = \theta(T_U) + \lambda \quad (5),$$

где $\theta(T_U)$ – начальный угол поворота Земли; λ – долгота города Уфа.

$$\Omega = 203{,}395\,° + 55{,}959° = 259{,}354° \quad (6)$$

Истинная аномалия будет равна широте Уфы: $M = 54{,}735°$.

По полученным выше параметрам орбиты произведем автоматизированный расчет сеансов связи в программе *GMAT*. Для этого, в окно исходных данных (рис. 1) введем дату по Грегорианской эпохе: 1 декабря 2024 года 12:00 UTC. Также выставим Кеплеровы элементы: малую полуось

(равна радиусу орбиты в нашем случае), эксцентриситет, наклонение, долготу восходящего узла, аргумент перицентра (при круглой орбите равен нулю), истинную аномалию. Далее зададим параметры приемной станции (рис. 2): угол обзора, широту, долготу и высоту над уровнем моря.

После запуска моделирования, программа выдает данные о трассе орбиты и изображение орбиты КА (рис. 3). Также мы получаем число событий радиосвязи КА и приемной станции (рис. 4). Это и есть искомые результаты расчетов сеансов радиосвязи КА и приемной станции.

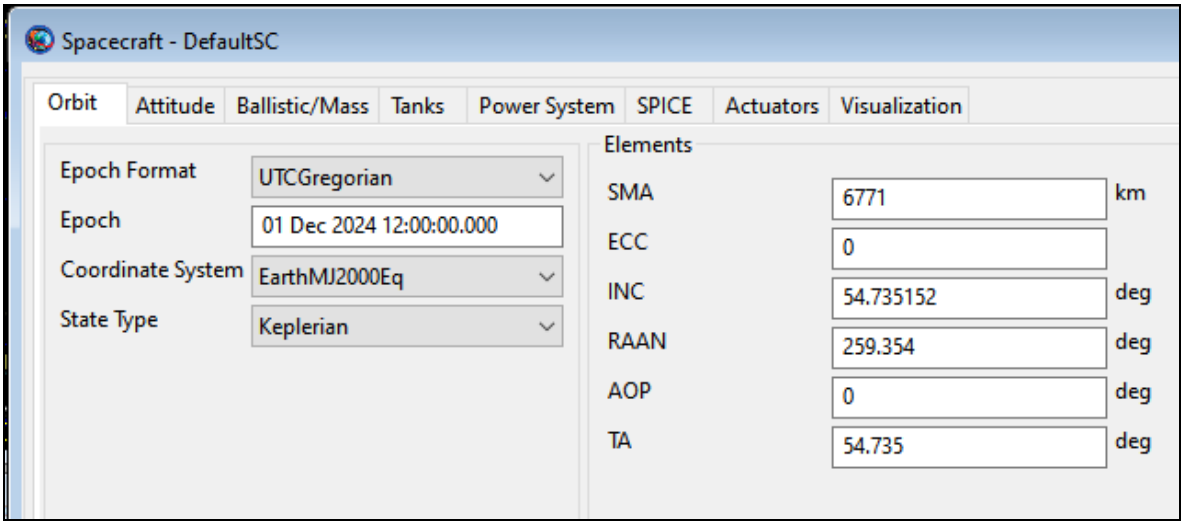


Рис. 1. Окно ввода начальных данных программы *GMAT*

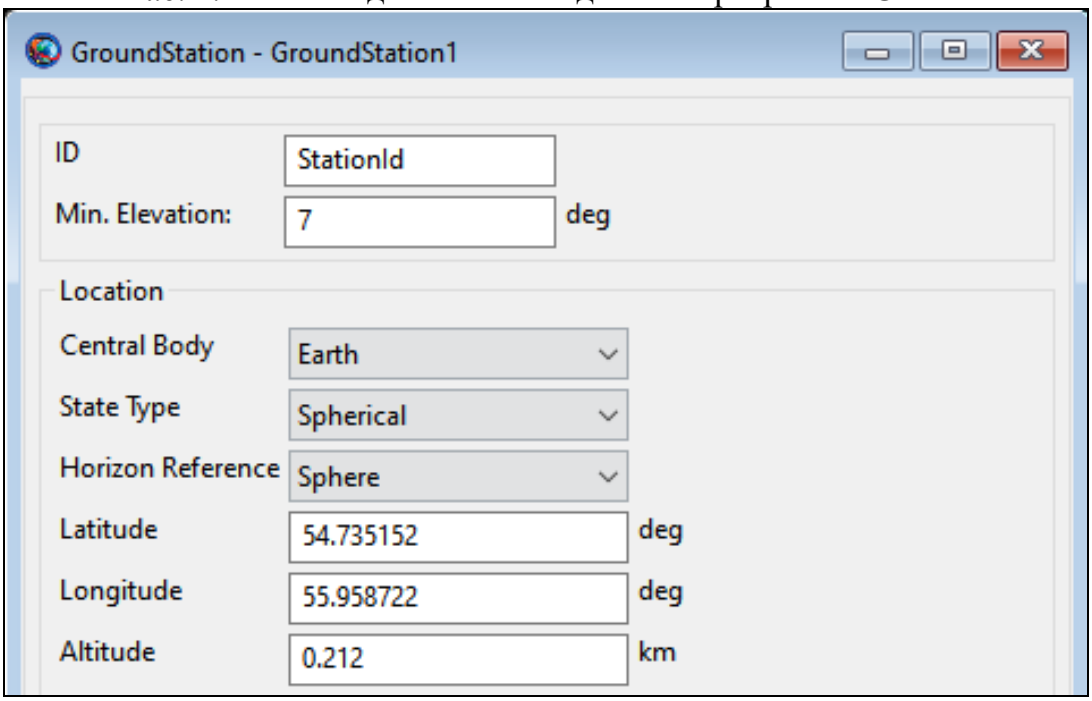


Рис. 2. Диалоговое окно параметров приемной станции

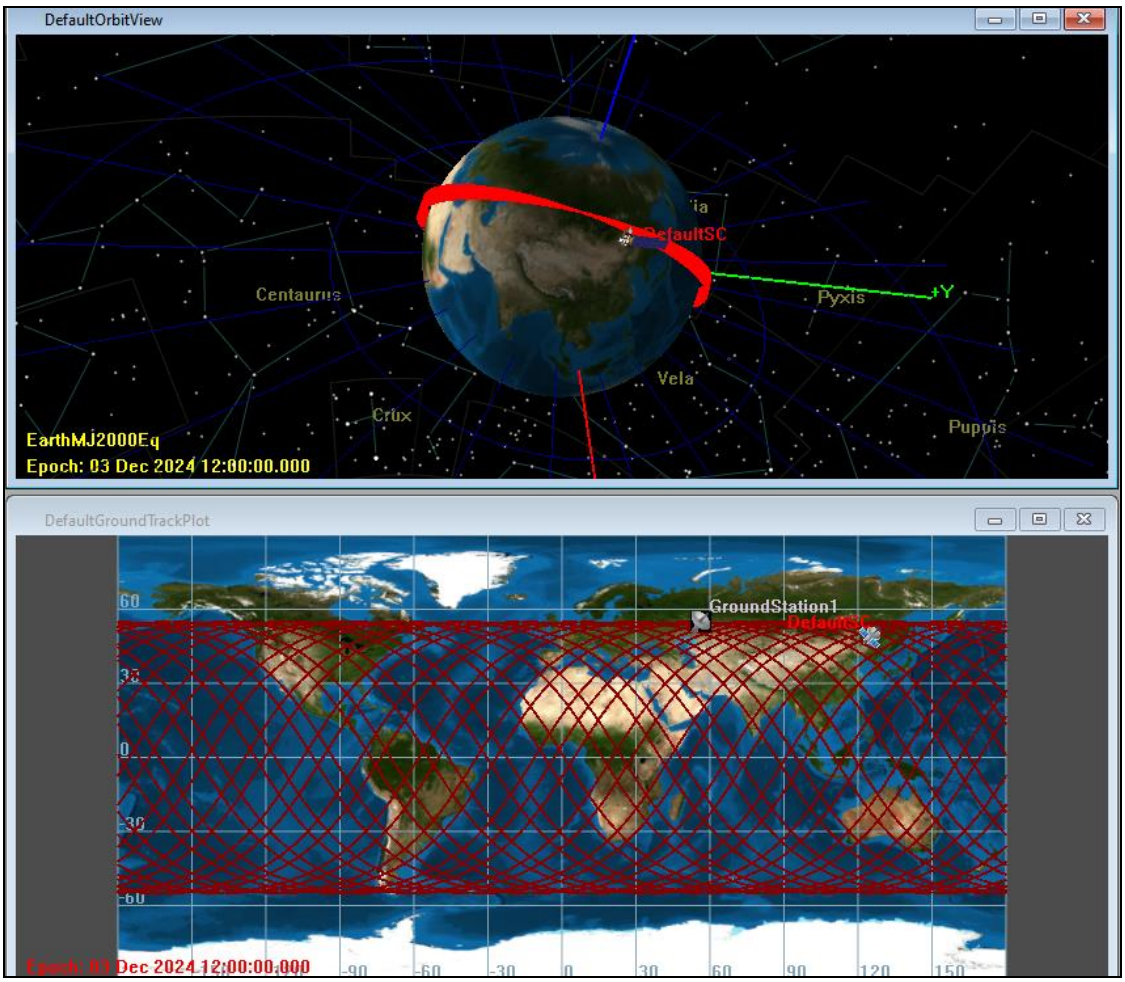


Рис. 3. Данные, полученные после моделирования

ContactLocator1

Target: DefaultSC

Observer: GroundStation1

Start Time (UTC)	Stop Time (UTC)	Duration (s)
01 Dec 2024 12:00:04.364	01 Dec 2024 12:06:23.365	379.00081468
01 Dec 2024 13:35:13.622	01 Dec 2024 13:42:32.379	438.75772627
01 Dec 2024 15:11:11.315	01 Dec 2024 15:18:32.930	441.61462997
01 Dec 2024 16:47:11.704	01 Dec 2024 16:54:15.334	423.62982383
01 Dec 2024 18:24:04.109	01 Dec 2024 18:28:02.131	238.02171112
02 Dec 2024 11:05:56.215	02 Dec 2024 11:11:04.764	308.54860051
02 Dec 2024 12:40:22.264	02 Dec 2024 12:47:33.355	431.09059859
02 Dec 2024 14:16:12.258	02 Dec 2024 14:23:33.677	441.41938831
02 Dec 2024 15:52:12.049	02 Dec 2024 15:59:28.301	436.25237216
02 Dec 2024 17:28:29.791	02 Dec 2024 17:34:15.533	345.74192183
03 Dec 2024 10:12:40.613	03 Dec 2024 10:15:03.849	143.23605200
03 Dec 2024 11:45:39.677	03 Dec 2024 11:52:32.294	412.61710444

Number of events : 12

Рис. 4. Число событий радиовидимости КА и приемной станции

Предложенный подход к оптимизации орбиты для достижения наибольшего количества сеансов связи позволяет уменьшить временные расходы на планирование орбиты космического аппарата. Расчет в автоматизированной системе *GMAT* позволяет обеспечить точное планирование сеансов связи с космическим аппаратом, для этого необходим базовый расчет орбиты. Были показаны основные методы теоретических расчетов орбит космических аппаратов. Получены данные о сеансах связи с наземной станцией в городе Уфа, с 1 по 3 декабря 2024 года для орбиты малого космического аппарата. В сложности, общее время радиосвязи составило 4440 секунд, максимальное – 441,6 секунды, минимальное – 143,2 секунды.

Библиографический список

1. Мирер С.А. *Механика космического полета. Орбитальное движение.* Москва, Московский физико-технический институт, 2013. – 13 с.
2. Dennis D. McCarthy. *Using UTC to determine the Earth's rotation angle.* NW Washington DC, Massachusetts, 2015. – 4 с.
3. The GMAT Development Team, *General Mission Analysis Tool (GMAT) User's Guide.* Maryland, Goddard Space Flight Center, 2007. – 57 с.
4. Скобелев П.О., Иванов А.Б., Симонова Е.В., Травин В.С., Жиляев А.А. *Мультиагентное планирование сеансов связи между микроспутниками и сетью наземных станций.* Самара, Институт проблем управления сложными системами РАН, 2014. – 5 с.
5. С.А. Аретинский, А.И. Дунаев, К.Д. Кириченко, Н.Ю. Кузнецов, Р.Д. Паньшин, О.А. Рубан, А.В. Слоква, С.С. Смирнов, Н.М. Яковлева, К.Ю. Якушина. *Материалы заданий всероссийской междисциплинарной олимпиады школьников «Национальная технологическая олимпиада».* Москва, 2024. – 87 с.

© Гайнанов И.А., 2024

УДК 517.97

М. АДЕМСОН
155390@stud.uust.ru
Науч. руководов. – Р.И. ШАЙХУТДИНОВ

Уфимский университет науки и технологий

К ВОПРОСУ ОБ УРАВНЕНИЯХ ДВИЖЕНИЯ ПО БРАХИСТОХРОНЕ

Аннотация: в работе представлена задача о нахождении уравнений движения материальной точки под действием силы тяжести по брахистохроне и оценка влияния начальных условий на время опускания точки по кривой.

Ключевые слова: вариационное исчисление; задача о брахистохроне, уравнения Эйлера-Лагранжа.

Известна задача вариационного исчисления о нахождении формы кривой наискорейшего спуска, где материальная точка спускается без трения под действием силы тяжести с некоторой высоты h на длину L по некоторой кривой (рис.1). Решением задачи является кривая циклоида, которую в контексте данной задачи называют брахистохроной. Уравнение циклоиды обычно записывают в параметрическом виде. Однако, при сравнении данной кривой с другими необходимо знать время движения по ней, то есть иметь зависимости, которые в механике называются уравнениями движениями точки по данной кривой. В данной работе демонстрируется как такие уравнения могут быть получены и проанализировано время опускания по брахистохроне в зависимости от начальных условий.

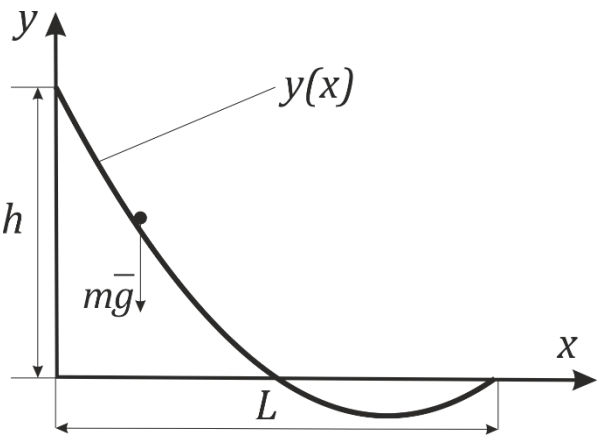


Рис. 10. Постановка задачи о брахистохроне

Задача по отысканию формы такой кривой, время движения по которой является минимальным, приводит к минимизации функционала

$$T = \int_{x_1}^{x_2} \frac{ds}{v} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2g(h-y)}} dx \to \min .$$

Так как данный функционал не зависит от координаты x, то с помощью тождества Бельтрами $F - y' \frac{\partial F}{\partial y'} = \text{const}$ получим дифференциальное уравнение

$$y' = -\sqrt{\frac{C_1 - (h-y)}{(h-y)}},$$

где C_1 – некоторая константа, решая которое с помощью замены $y = h - C_1 \sin^2 \frac{\theta}{2}$, находим:

$$\begin{cases} x = C_2 + \frac{C_1}{2}(\theta - \sin\theta) \\ y = h - \frac{C_1}{2}(1 - \cos\theta) \end{cases}.$$

Учитывая, что $x(0) = 0$, то $C_2 = 0$.

Тогда окончательно:

.

$$\begin{cases} x = \dfrac{C_1}{2}(\theta - \sin\theta) \\ y = h - \dfrac{C_1}{2}(1 - \cos\theta) \end{cases}. \qquad (1)$$

Уравнения (1), как известно, представляют собой параметрическую форму кривой циклоиды.

Для определения параметров этой циклоиды и времени движения по ней для начала определим из условия (рис. 1) параметр θ_L при котором точка достигает требуемого положения:

$$y(\theta_L) = 0 = h - \frac{C_1}{2}(1 - \cos\theta_L) \text{ и } x(\theta_L) = L = \frac{C_1}{2}(\theta_L - \sin\theta_L).$$

Из чего следует, что для данных h и L параметры C_1 и θ_L могут быть определены из системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} C_1 = \dfrac{2h}{(1 - \cos\theta_L)} = \dfrac{2L}{(\theta_L - \sin\theta_L)} \\ h(\theta_L - \sin\theta_L) - L(1 - \cos\theta_L) = 0 \end{cases}. \qquad (2)$$

Для поиска уравнений движения определим связь между временем t параметром кривой циклоиды θ. С учетом следующих соотношений:

$$y' = \frac{y'_\theta}{x'_\theta} = -\frac{\sin\theta}{1 - \cos\theta}, h - y = \frac{C_1}{2}(1 - \cos\theta), dx = \frac{C_1}{2}(1 - \cos\theta)d\theta$$

время будет

$$t = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sqrt{1 + y'^2}}{\sqrt{2g(h - y)}} dx = \int_0^\theta \sqrt{\frac{C_1}{2g}} d\theta = \sqrt{\frac{C_1}{2g}}\theta.. \qquad (3)$$

Тогда уравнения движения определятся как

$$\begin{cases} x = \dfrac{C_1}{2}\left(\sqrt{\dfrac{2g}{C_1}}t - \sin\sqrt{\dfrac{2g}{C_1}}t\right) \\ y = h - \dfrac{C_1}{2}\left(1 - \cos\sqrt{\dfrac{2g}{C_1}}t\right) \end{cases}. \qquad (4)$$

Проанализируем зависимость параметров C_1, θ_L и времени опускания t зависимости от данных h и L, введя безразмерное $p = \frac{h}{L}$. Для этого найдем численно из (2) параметры C_1, θ_L для каждого $p = 0{,}1 \ldots 2$. Сопоставляя найденные C_1, θ_L, t каждому p построим зависимости этих величин от этого параметра (рис.2-4). Видно, что время опускания среди всех кривых наименьшего спуска будет наименьшим при $p = 0{,}6$.

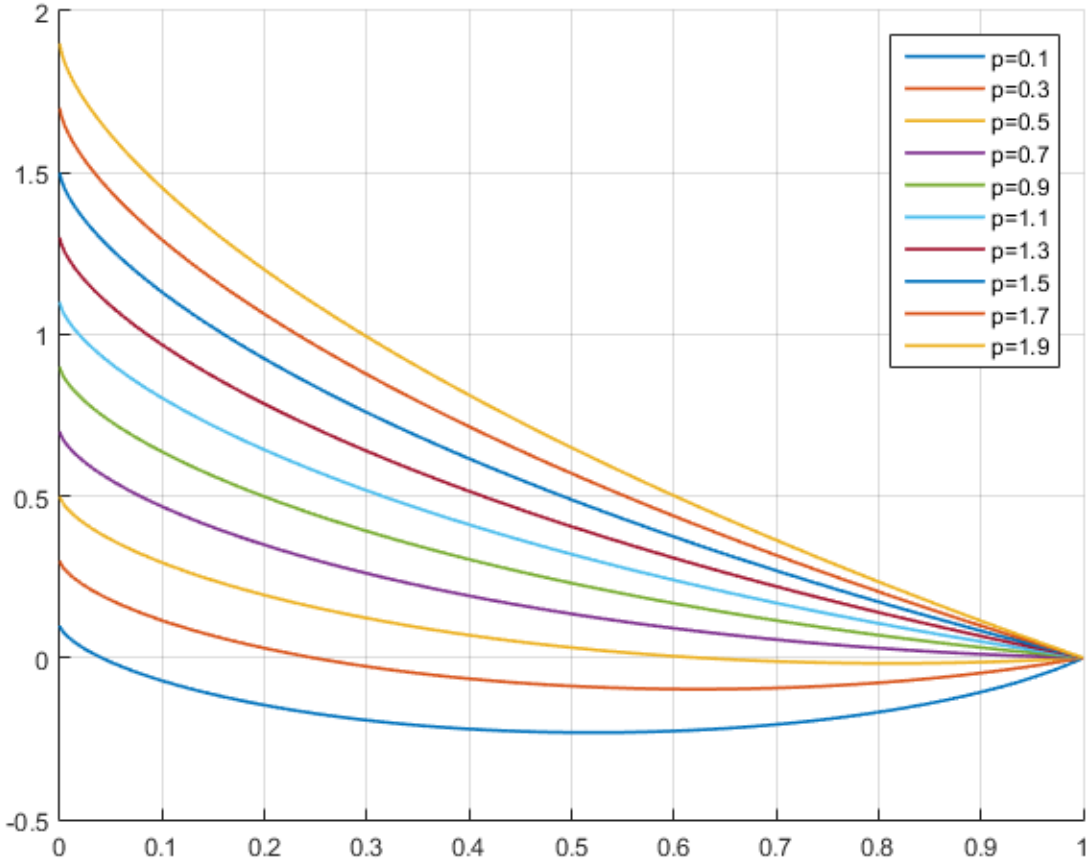


Рис. 2. Формы кривых брахистохроны при разных начальных параметрах

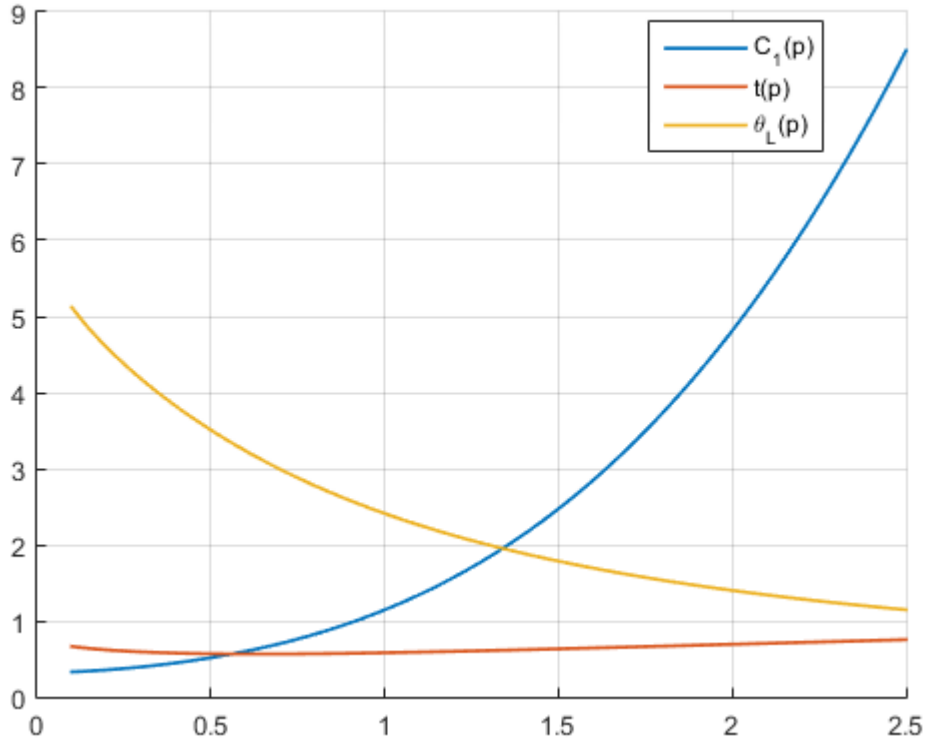


Рис. 3. Зависимости параметров кривой брахистохроны и времени опускания материальной точки от начальных параметров

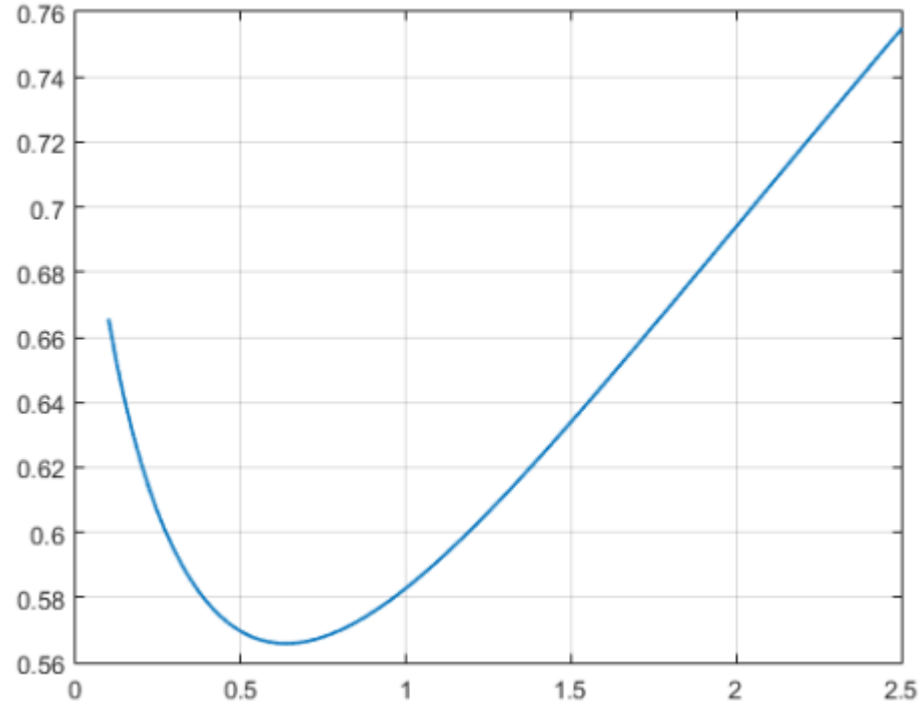


Рис. 4. Время опускания материальной точки по брахистохроне в зависимости от начальных параметров

В работе получены уравнения движения материальной точки по брахистохроне и проанализированы параметры её форм в зависимости от

начальных параметров. Обнаружено, что при отношении высоты опускания к длине равном 0,6 точка будет затрачивать на спуск наименьшее время.

Библиографический список

1. Дронг, В.И. и др. Курс теоретической механики. – 2005.
2. Смирнов, В.И. Вариационное исчисление. – Рипол Классик, 2013.
3. Coleman R.A. detailed analysis of the brachistochrone problem //arXiv preprint arXiv:1001.2181. – 2010.

© Адемсон М., 2024

УДК 531.011

Т.М. ИСЯНБАЕВ, А.М. КАШАПОВ, И.Ф. ЛУТФУЛЛИН
219806@stud.uust.ru
Науч. руководов. – Р.И. ШАЙХУТДИНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ОБЗОР СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ НЕКОТОРЫХ ВЕЛИЧИН В СТАТИКЕ

Аннотация: в работе обсуждаются некоторые классические методы векторной алгебры в разделе статики и удобство их последующего применения в вычислениях символьными методами компьютерной алгебры.

Ключевые слова: векторная алгебра, векторное произведение, момент сил, векторная статика, компьютерная алгебра.

При изучении теоретической части раздела статика вводятся понятия проекция силы на ось, момент силы относительно точки и оси, которые имеют различные приемы вычисления при решении типовых задач статики листе бумаги. Однако при вычислении данных величин с помощью различных инструментов ПК необходимо вновь обращаться к их определениям, так как компьютеру не составляет труда вычислить то, что мы избегали вычислять от руки.

Вспомним, что проекцией одного вектора на другой вектор вычисляется как:

$$\text{пр}_{\boldsymbol{b}}\,\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{b}}; \quad (1)$$

момент силы относительно точки задается векторным произведением двух вектор вычисляется векторным произведением радиус вектора и силы:

$$\boldsymbol{M_O(F)} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}; \quad (2)$$

момент силы относительно оси задается определяется проекцией вектора момента относительно любой точки оси на единичный вектор оси:

$$M_l(\boldsymbol{F}) = (\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}) \cdot \boldsymbol{e}_l. \quad (3)$$

С помощью соотношений 1-3, уравнения равновесия в пространстве с учетом того, что главный вектор всех сил будет $\boldsymbol{R} = \sum \boldsymbol{F}_i$ и главный момент относительно начала координат $\boldsymbol{L}_O = \sum \boldsymbol{r}_i \times \boldsymbol{F}_i + \sum \boldsymbol{M}_i$ будут:

$$\begin{cases} \sum F_x = \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{i} = 0 \\ \sum F_y = \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{j} = 0 \\ \sum F_z = \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{k} = 0 \\ \sum L_x = \boldsymbol{L}_O \cdot \boldsymbol{i} = 0 \\ \sum L_y = \boldsymbol{L}_O \cdot \boldsymbol{j} = 0 \\ \sum L_z = \boldsymbol{L}_O \cdot \boldsymbol{k} = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

В средствах компьютерной алгебры, существуют структуры языка программирования, которые так или иначе имеют сходные характеристики с векторами или прямо олицетворяют их. В отрытом доступе языка Octave, который разрабатывался как MATLAB с открытым исходным кодом, также, как и в MATLAB, любая обычная переменная является вектором. Для осуществления действий над векторами, кроме сложений и умножений на числа существуют также операции взятия скалярного и векторного умножения векторов, задаваемых в коде следующим образом:

```
dot(a,b)
```

```
cross(a,b)
```

Команды задающие уравнения имеют синтаксис:

```
eq1=x+y==a
```

где первое равенство означает запись уравнения в переменную, а второе собственно равенство уравнения.

С учетом соотношений и данных команд рекомендуемый набор действий при решении задач на равновесие будет следующим:

– ввести параметры геометрии в задаче;

– ввести известные компоненты всех векторов $\boldsymbol{F}_i$, а также неизвестные компоненты реакций $\boldsymbol{R}_i$, ввести компоненты всех пар сил $\boldsymbol{M}_i$;

– ввести компоненты с учетом заданных геометрических параметров координаты всех точек приложения сил $\boldsymbol{r}_i$;

– с помощью соотношений 4 составить уравнения равновесия, записав их в переменные eq1, eq3, eq4, eq5, eq6;

– с помощью команды solve решить данные уравнения относительно вектора неизвестных реакций $\boldsymbol{R}_i$.

– если некоторые переменные были символьными, то использовать функции sub и eval для получения численных значений.

```
# your code goes here

% задача

syms F1 F2 X_A Y_A X_C M alfa n1 n2 L H h real

% задаём компоненты сил
F1v = F1 * [cos(alfa); -sin(alfa); 0];
F2v = F2 * [n1; n2; 0];
R_Av = [X_A; Y_A; 0];
R_Cv = [-X_C; 0; 0];
Mv          = [0; 0; M];

% задаём векторы положений точки приложений сил для моментов

AAv = [0; 0; 0];
ABv = [L/2; 0; 0];
ACv = [L; h; 0];
ADv = [L; H; 0];

% уравнения равновесия

eq1 = dot((F1v + F2v + R_Av + R_Cv), [1;0;0])==0;
eq2 = dot((F1v + F2v + R_Av + R_Cv), [0;1;0])==0;
eq3 = dot((cross(AAv, R_Av) + cross(ABv, F1v) + cross(ACv, R_Cv) + cross(ADv, F2v) + Mv), [0;0;1])==0;

% Организуем систему линейных уравнений
eqs = [eq1 eq2 eq3];
vars = [X_A, Y_A, X_C];

%Кладём решения в переменные X_As Y_As X_Cs
[X_As Y_As X_Cs] = solve(eqs, vars);

%Создаём строку численных значений
allvars = [F1 F2 M alfa n1 n2 L H h];
alldata = [100 100 50 sym(pi)/6 3/5 4/5 5 5 5/2];

%Подставляем вместо символьных переменных численные значения и вычисляем;

X_Anum = eval(subs(X_As, allvars, alldata))
Y_Anum = eval(subs(Y_As, allvars, alldata))
X_Cnum = eval(subs(X_Cs, allvars, alldata))
```

Приведем тут скрипт, решающий типовую задачу статики:

В работе показана реализация решения задачи статики с помощью средств символьной алгебры в Octave. Приведены указания, позволяющие записать некоторые часто использующиеся операции с векторами на языке Octave. Как видно, языки программирования и реализация для вычислений ПК использует средства, предлагаемые теорией данного раздела напрямую.

Библиографический список

1. Дронг В.И. и др. Курс теоретической механики. – 2005.
2. Stahel A. Octave and MATLAB for Engineering Applications. – Springer, 2022.

© Исянбаев Т.М., Кашапов А.М., Лутфуллин И.Ф., 2024

СЕКЦИЯ 1.6. ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА И ТРАНСПОРТНАЯ ЛОГИСТИКА

УДК 621.22

В.Е. АЛЕКСЕЕВ
alekseev_vlad2001@mail.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ НАСОСА

Аннотация: научная статья посвящена разработке и расчету математической модели гидравлической системы с регулятором давления. Составлена математическая модель, проведен анализ поведения гидравлической системы при возникновении возмущающего момента, возникающего на исполнительном механизме.
Ключевые слова: регулятор постоянной мощности; математическая модель; регулирование; гидросистема; *MathCAD*.

Основными энергетическими параметрами привода являются давление и объемный либо массовый расход рабочей среды, которые определяют мощность привода, развиваемую на выходном звене. Выбор значений этих параметров зависит от ряда условий и, в первую очередь, от способа регулирования как исполнительного двигателя привода, так и источника питания. От способа регулирования зависит и эффективность использования мощности, потребляемой источником питания, т.е. КПД привода [1].

В практике распространены регуляторы, в которых для ограничения мощности при повышении давления подача уменьшается в такой зависимости, при которой произведение подачи и давления сохраняются постоянными [2]. Регуляторы мощности предназначены для автоматического обеспечения постоянства мощности при изменении нагрузки. Постоянный отбор полной мощности от приводящего двигателя в широком диапазоне нагрузок и скоростей обеспечивает наибольшую производительность рабочего органа машины [3]. Регулирование мощности осуществляется путем изменения расхода рабочей жидкости в зависимости от величины давления в гидросистеме.

Для расчета статических и динамических характеристик была разработана гидравлическая расчетная схема, изображенная на рис. 1, состоящая из регулятора мощности насоса и исполнительного двигателя (гидромотора).

Регулятор мощности насоса состоит из управляющего золотника, подающего жидкость под давлением $P_{\text{пит}}$ в полость поршня с большей площадью, обеспечивая его движение, тем самым изменяя рабочий объем насоса за счет изменения угла наклона шайбы.

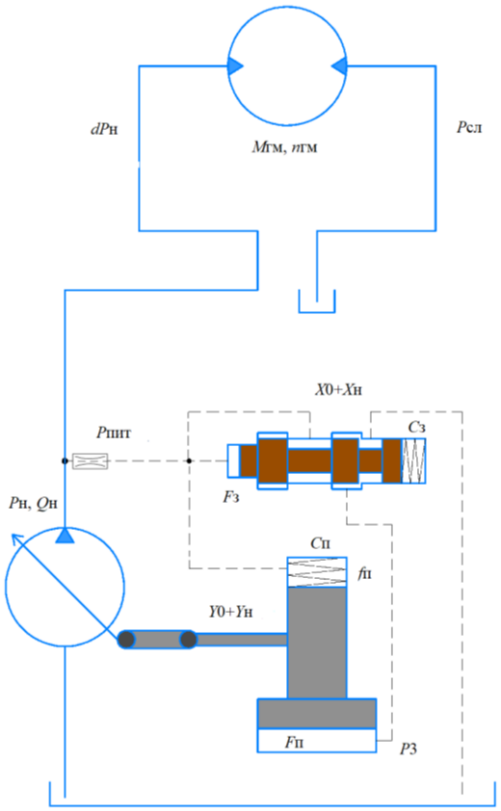


Рис. 1. Расчётная схема гидравлического контура с регулятором мощности насоса

На основании принципиальной гидравлической схемы (см. рис. 1) были составлены следующие уравнения. Баланс сил на управляющем золотнике и поршне регулятора насоса:

$$x_0 \cdot C_з = F_з \cdot P_{\text{пит}} ; \quad (1)$$

$$y_0 \cdot C_п = F_п \cdot P_З - f_п \cdot P_{\text{пит}} , \quad (2)$$

где x_0 и y_0 – начальное положение золотника и поршня; $F_з$ и $F_п$ – площади золотника и большей полости поршня; $f_п$ – площадь в меньшей полости поршня; $C_з$ и $C_п$ – жесткости пружин золотника и поршня; $P_{\text{пит}}$ – давление питания регулятора; $P_З$ – давление в полости большей части поршня.

Баланс расходов в гидравлической системе и в регуляторе:

$$\frac{Q_{\text{н}}}{y_{\max}}\cdot\left(y_{\max}-y_0\right)=\frac{V_{\text{гм}}\cdot n_{\text{гм}}}{\eta_{\text{о}}}+\mu\cdot f_{\text{др}}\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\left(P_{\text{н}}-P_{\text{пит}}\right)}\,; \tag{3}$$

$$\mu\cdot f_{\text{др}}\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\left(P_{\text{н}}-P_{\text{пит}}\right)}=\mu\cdot b\cdot x_0\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\left(P_{\text{пит}}-P_{\text{З}}\right)}\,, \tag{4}$$

где $y_{\max}$ – максимальный ход поршня; $Q_{\text{н}}$ – подача насоса; $V_{\text{гм}}$ – рабочий объем гидромотора; $n_{\text{гм}}$ – обороты гидромотора; $f_{\text{др}}$ – площадь проходного сечения дросселя; $P_{\text{н}}$ – давление насоса.

С помощью уравнений баланса сил и баланса расходов были определены x_0, y_0, $f_{\text{др}}$ и $P_{\text{З}}$.

Подбирая различные значения жесткости пружины поршня $C_{\text{п}}$ и давления питания регулятора $P_{\text{пит}}$ вблизи истинного были построены статические характеристики, показывающие влияние этих параметров (рис. 2) на перемещение золотника и поршня, а также на давление, возникающее в большей полости поршня.

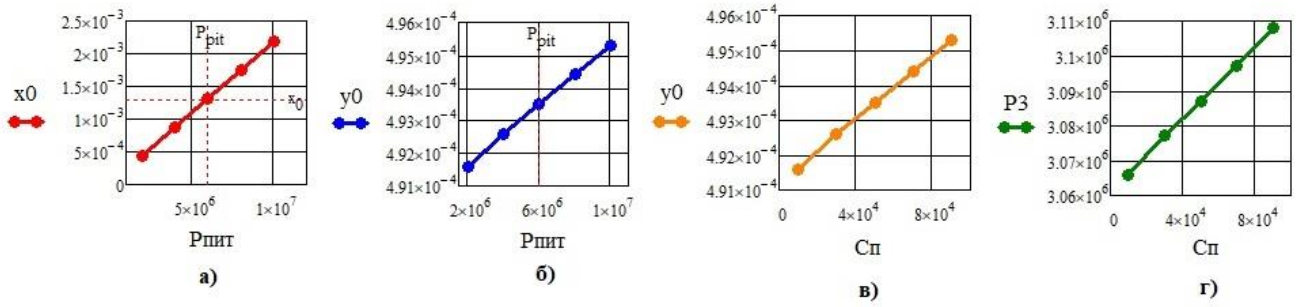


Рис. 2. Статические характеристики гидравлической системы:
а) – зависимость начального положения золотника от давления питания регулятора;
б) – зависимость начального положения поршня от давления питания регулятора;
в) – зависимость начального положения поршня от жесткости пружины поршня;
г) – зависимость давления в большей полости поршня от жесткости пружины поршня

На основании представленных зависимостей (см. рис. 2) можно сделать вывод о том, что с увеличением давления питания регулятора $P_{\text{пит}}$ увеличиваются начальные положения золотника с $5\cdot10^{-4}$ до $2\cdot10^{-3}$ м и поршня с $4{,}92\cdot10^{-4}$
до $5\cdot10^{-3}$ м, также при увеличении жесткости пружины поршня $C_{\text{п}}$ в диапазоне от $1\cdot10^{4}$ до $9\cdot10^{4}$ Н/м наблюдается увеличение начального положения поршня.

Для расчета динамических характеристик математической модели были приняты типовые допущения [4].

Математическая модель гидравлического контура с регулятором представлена в виде следующих дифференциальных уравнений:

1. Уравнение баланса сил на поршне:

$$m_{\text{п}} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{\text{п}} \cdot P_{\text{з}} - C_{\text{п}} \cdot y_0 - f_{\text{п}} \cdot P_{\text{пит}} - k_{\text{уп}} \cdot \frac{dy}{dt}, \quad (5)$$

где y_0 – начальное положение поршня.

2. Уравнение баланса моментов на гидромоторе:

$$J \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} = \frac{V_{\text{гм}} \cdot (P_{\text{н}} - P_{\text{сл}})}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{гм}}} - k_{\text{ум}} \cdot \omega - M_{\text{гм}} - \Delta M - M_{\text{тр}}; \quad (6)$$

где ω – угловая скорость гидромотора; ΔM – возмущающий момент гидромотора; $M_{\text{тр}}$ – момент трения.

3. Уравнение неразрывности в напорной линии гидромотора:

$$\frac{dP_{\text{н}}}{dt} = \frac{E}{V} \cdot \left(\frac{Q_{\text{н}}}{y_{\max}} \cdot (y_{\max} - y_0) - \frac{V_{\text{гм}} \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{о}}} - \mu \cdot f_{\text{др}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{н}} - P_{\text{пит}})} \right), \quad (7)$$

где $y_{\max}$ – максимальный ход поршня.

4. Уравнение неразрывности в напорной линии золотника:

$$\frac{dP_{\text{пит}}}{dt} = \frac{E}{V} \cdot \left(\mu \cdot f_{\text{др}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{н}} - P_{\text{пит}})} - \mu \cdot b \cdot \left(x_0 + \frac{P_{\text{пит}} \cdot F_{\text{з}}}{C_{\text{з}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{пит}} - P_{\text{з}})} + f_{\text{п}} \frac{dy}{dt} \right), \quad (8)$$

где x_0 – начальное положение управляющего золотника.

5. Уравнение неразрывности для поршня:

$$\frac{dP_{\text{з}}}{dt} = \frac{E}{V} \cdot \left(\mu \cdot b \cdot \left(x_0 + \frac{P_{\text{пит}} \cdot F_{\text{з}}}{C_{\text{з}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{пит}} - P_{\text{з}})} - F_{\text{п}} \cdot \frac{dy}{dt} \right). \quad (9)$$

Уравнения представляются в виде системы из пяти уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} m_{\text{п}} \cdot \dfrac{d^2 y}{dt^2} = F_{\text{п}} \cdot P_{\text{з}} - C_{\text{п}} \cdot y_0 - f_{\text{п}} \cdot P_{\text{пит}} - k_{\text{уп}} \cdot \dfrac{dy}{dt} \\ J \cdot \dfrac{d^2 \omega}{dt^2} = \dfrac{V_{\text{гм}} \cdot (P_{\text{н}} - P_{\text{сл}})}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{гм}}} - k_{\text{ум}} \cdot \omega - M_{\text{гм}} - \Delta M - M_{\text{тр}} \\ \dfrac{dP_{\text{н}}}{dt} = \dfrac{E}{V} \cdot \left(\dfrac{Q_{\text{н}}}{y_{\max}} \cdot (y_{\max} - y_0) - \dfrac{V_{\text{гм}} \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{о}}} - \mu \cdot f_{\text{др}} \cdot \sqrt{\dfrac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{н}} - P_{\text{пит}})} \right) \\ \dfrac{dP_{\text{пит}}}{dt} = \dfrac{E}{V} \cdot \left(\mu \cdot f_{\text{др}} \cdot \sqrt{\dfrac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{н}} - P_{\text{пит}})} - \mu \cdot b \cdot \left(x_0 + \dfrac{P_{\text{пит}} \cdot F_{\text{з}}}{C_{\text{з}}} \right) \cdot \sqrt{\dfrac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{пит}} - P_{\text{з}})} + f_{\text{п}} \dfrac{dy}{dt} \right) \\ \dfrac{dP_{\text{з}}}{dt} = \dfrac{E}{V} \cdot \left(\mu \cdot b \cdot \left(x_0 + \dfrac{P_{\text{пит}} \cdot F_{\text{з}}}{C_{\text{з}}} \right) \cdot \sqrt{\dfrac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{пит}} - P_{\text{з}})} - F_{\text{п}} \cdot \dfrac{dy}{dt} \right) \end{cases} \quad (10)$$

По результатам численной реализации математической модели (10) получены графики переходных процессов (рис. 3–5).

Программу расчёта и построения динамических характеристик выполняем в прикладном математическом пакете *MathCAD*. Интегрирование размерной модели выполняется методом Рунге-Кутта с фиксированным шагом. Число шагов 50000–100000 [4].

Из графика угловой скорости и момента гидромотора (рис. 3) видно, что угловая скорость гидромотора составляет 120 рад/с, а момент 750 Н·м. Это достигается за 0,5 секунды.

Из графика перемещения поршня (рис. 4) видно, что перемещение поршня составляет 0,014 метра, а скорость 0,2 м/с. Это достигается за 0,5 секунды.

Из графика перепада давления и подачи насоса (рис. 5) видно, что после перекладки насоса на новую производительность изменение давления в системе до 20 МПа происходит за 0,5 секунды.

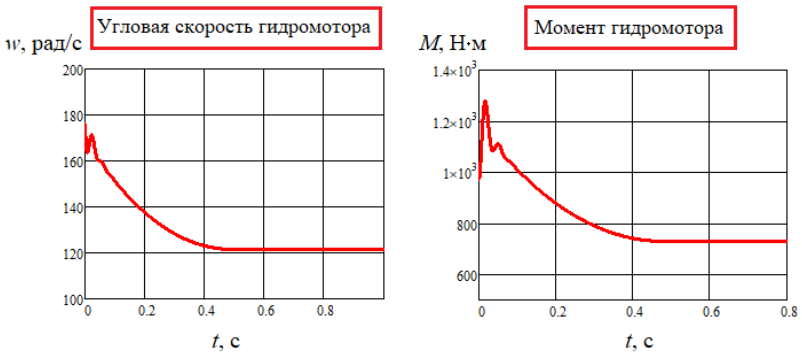


Рис. 3. Угловая скорость и момент гидромотора

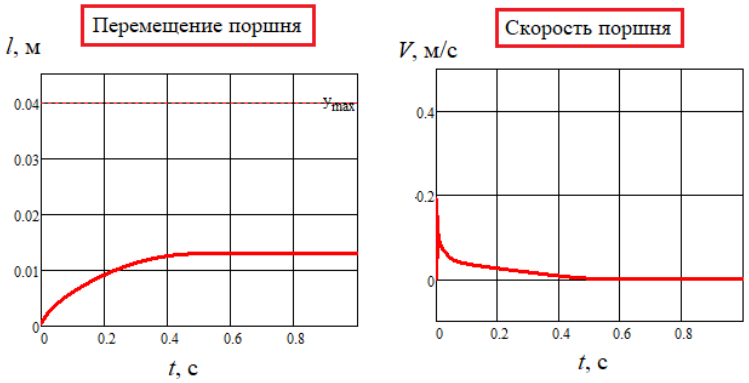


Рис. 4. Перемещение и скорость поршня

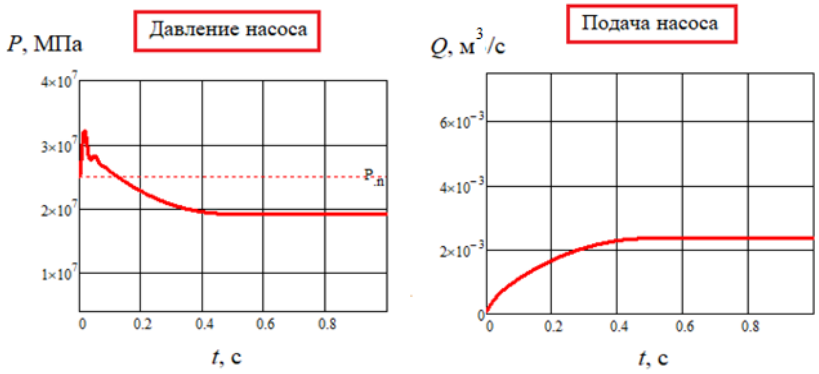


Рис. 5. Перепад давления и подача насоса

Исследовано, как отрабатывает регулятор мощности в зависимости от изменения значения возмущающего момента ΔM (рис. 6). Рассчитана модель и построены графики переходных процессов.

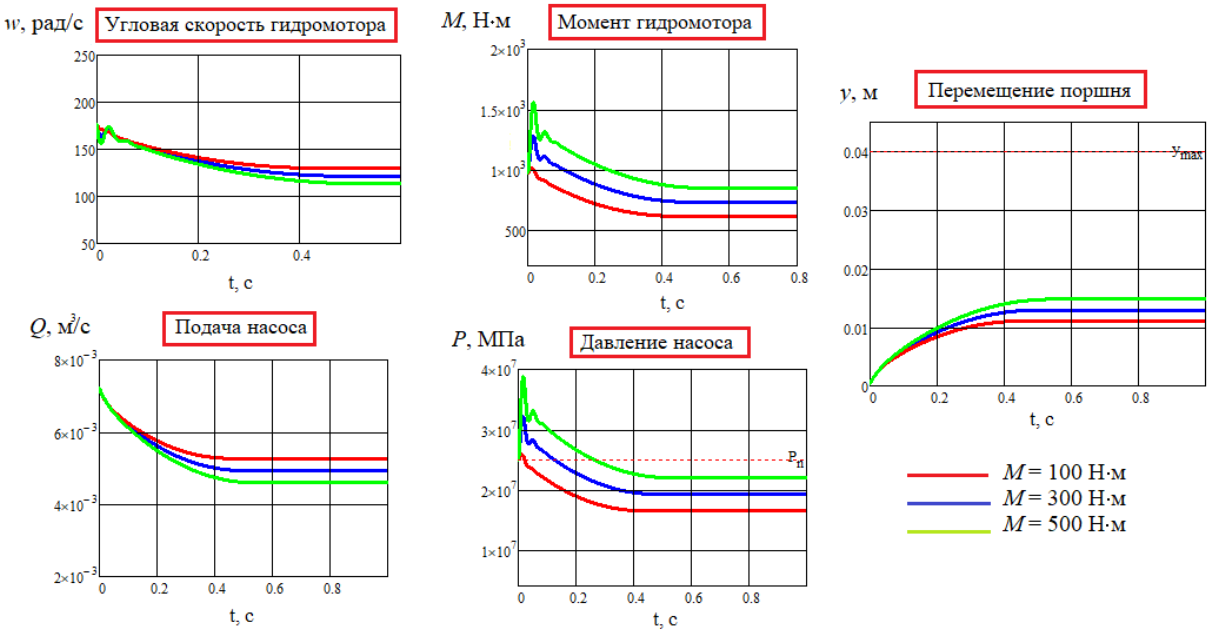


Рис. 6. Влияние возмущающего момента на переходные процессы

Проанализировав полученные характеристики (см. рис. 6), можно сделать вывод о том, что при увеличении возмущающего момента увеличивается давление в контуре. Повышение давления в системе заставляет регулятор уменьшить подачу за счет передвижения поршня насоса, тем самым сохранить постоянной потребляемую мощность.

В ходе разработки и расчета математической модели контура с регулятором постоянного давления была выполнена параметризация регулятора насоса. Переходные процессы системы подтверждают правильность работы регулятора гидравлической системы. При расчетах математического

моделирования можно оценивать переходные процессы контура, а также выбрать оптимальные геометрические параметры многопозиционного золотникового гидрораспределителя и поршня насоса. Дальнейшие работы направлены на разработку безразмерной математической модели с целью построения обобщенных характеристик с выделением области устойчивости и реализации предварительного параметрического синтеза.

Библиографический список

1. Зенин, В.Г. Динамика и регулирование гидропневмосистем. Учебное пособие // Издательство ЮУрГУ, 2011 г.
2. Башта, Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем. Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1974. – 606 с.: ил.
3. Навроцкий, К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов: Учебник для студентов вузов по специальности «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика». – М.: Машиностроение. 1991. – 384 с.: ил.
4. Петров, П.В. Численное исследование нелинейных гидромеханических систем самолёта / П.В. Петров, В.А. Целищев, Д.А. Кудерко // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2023. – Т. 27, № 2(100). – С. 92–99. – DOI 10.54708/19926502_2023_27210092. – EDN FLTSAA.

© Алексеев В.Е., 2024

УДК 630.36

Д.С. БИКМАЕВА, А.Р. РАХИМОВА
bikmaewa.di@yandex.ru, adelya.rakhimova03@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

АВАРИЙНАЯ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЁТА

Аннотация: в статье рассматривается аварийная гидравлическая система гражданского самолёта. Приведена классификация гидравлических аварийных систем. Подробно расписано применение блока передачи мощности и его преимущества.
Ключевые слова: аварийная гидравлическая система самолёта (ГСС); блок передачи мощности (БПМ).

Гидравлическая система в самолете играет важную роль в управлении многими функциями, включая управление тормозами, шасси, рулями направления и некоторыми элементами крыла.

Аварийная гидравлическая система гражданского самолёта – это резервная система, которая предназначена для обеспечения работы важных функций самолёта при отказе основной гидравлической системы.

Аварийная гидравлическая система гражданского самолета состоит из нескольких ключевых компонентов, которые обеспечивают ее функциональность и надежность.

Основные элементы аварийной гидравлической системы включают:

1. Резервуар, который хранит гидравлическую жидкость, необходимую для работы системы. Он должен быть герметичным и устойчивым к утечкам.

2. Гидравлический насос, отвечающий за циркуляцию рабочей жидкости в гидравлической системе, может приводиться как механическим приводом от основного двигателя, так и от электродвигателя, запитанного от генератора на основном двигателе или от генератора, работающего от набегающего потока воздуха (воздушная турбина).

3. Трубопроводы, по которым осуществляется перекачка рабочей жидкости от насоса к различным исполнительных механизмам.

4. Управляющие клапаны, позволяющие направлять поток жидкости к различным исполнительным механизмам, таким как закрылки, шасси и рулевые поверхности.

5. Исполнительные механизмы, которые выполняют механическую работу, например, приводы для управления закрылками или шасси.

6. Фильтры, очищающие гидравлическую жидкость от загрязнений, чтобы предотвратить повреждение компонентов системы.

7. Датчики и индикаторы, которые обеспечивают информацию о состоянии системы, включая давление и уровень жидкости, что позволяет пилотам контролировать ее работоспособность.

Принцип работы заключается в том, что в случае отказа основной гидравлической системы пилот может активировать аварийную систему с помощью переключателя в кабине. После чего аварийный насос начинает перекачивать гидравлическую жидкость из резервуара через фильтры и управляющие клапаны к исполнительным механизмам.

Если гидравлическая система выходит из строя, это может серьёзно затруднить управление самолетом. Например, если система, отвечающая за управление шасси, перестает работать, то данный отказ зачастую приводит к самым негативным последствиям.

Таким образом, надёжная и эффективная гидравлическая система критически важна для безопасности [1].

По типу передачи управляющего сигнала на клапан, активирующий аварийную систему, различают электрические и механические способы активации. Электрические датчики имеют погрешность измерений, а также

возможны ложные срабатывания, что может привести к ложной активации аварийной системы.

В качестве источника энергии в аварийных системах используют блоки передачи мощности, передающие мощность без обмена гидравлической жидкостью между системами. В теории для упрощения передачи мощности возможно использование гидротрансформаторов.

Классификация аварийных систем летательных аппаратов представлена на рис. 1.

Гидротрансформаторы предназначены для аварийного создания давления в гидравлической системе. При отказе основного двигателя или приводимого им насоса мощность передается из одной гидравлической системы в другую, также без передачи жидкости. Они состоят из двух нерегулируемых моторов-насосов. В гидротрансформаторах моторы-насосы присоединены каждый к своей системе, и при этом их рабочие жидкости между собой не смешиваются.

В силу простоты своей конструкции и удобства эксплуатации чаще используются блоки передачи мощности. Благодаря своей конструктивной особенности они дешевле и проще в эксплуатации чем их аналоги, а, следовательно, и более рентабельны для аварийных систем гражданской авиации.

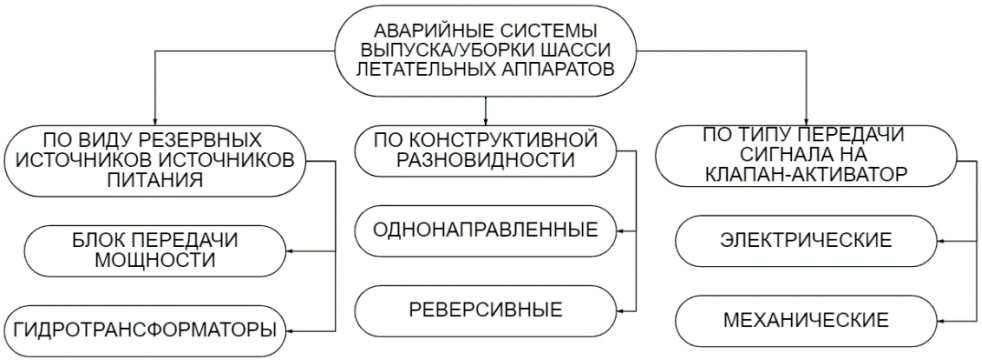


Рис. 1. Классификация принципов функционирования аварийных систем выпуска / уборки шасси летательных аппаратов [2]

Блок передачи мощности (англ. Power Transfer Unit, далее БПМ) – это устройство, используемое между двумя независимыми гидравлическими системами летательных аппаратов для создания давления в аварийной гидравлической системе в случае отказа насоса в одной из них (рис. 2). Включение происходит автоматически.

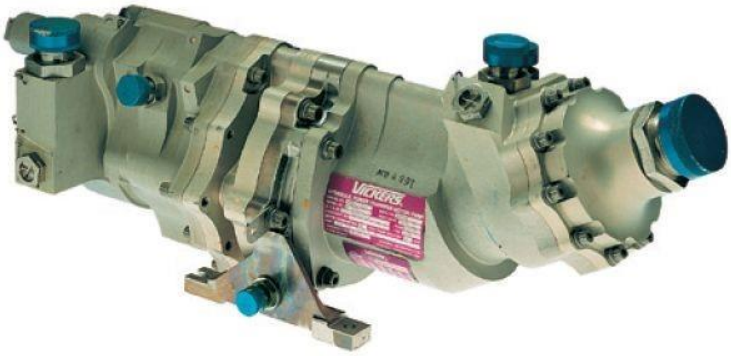


Рис. 2. Блок передачи мощности [3]

БПМ состоит из мотора и насоса, механически связанных между собой. Двигатель и насос используются для питания каждой из двух независимых систем. Поскольку одна гидравлическая система будет питать другую систему, то вторая система тоже сможет питать первую. Одним из важных моментов, которые следует учитывать здесь, является то, что передача энергии между системами не сопровождается передачей гидравлической жидкости. Работа выполняется механически. В каждой системе используется своя жидкость.

БПМ в гражданских самолётах чаще всего применяются для выпуска / уборки шасси в момент аварии. Существуют прототипы, имеющие более широкий диапазон возможностей: восстановление систем управления элеронами, руля поворота, руля высоты и так далее. БПМ способен работать в тяжелых условиях эксплуатации, в условиях низких температур. Температура рабочей жидкости может составлять от –55℃ до +107℃. Простота и дешевизна конструкции обеспечили распространение БПМ не только в гражданской, но и в военной сфере.

Библиографический список

1. Блок передачи мощности [Электронный ресурс] // URL: https://ru.knowledgr.com/05354669/ЕдиницаПередачиВласти (Дата обращения: 03.11.2024).

2. How Does PTU (Power Transfer Unit) Work? [Электронный ресурс] // URL: https://aircrafttechnic.com/aircraft_mechanic/how-does-ptu-power-transfer-unit-work/ (Дата обращения: 05.11.2024).

3. Power Transfer Unit [Электронный ресурс] // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_transfer_unit (Дата обращения: 10.11.2024).

4. Citation X Power Transfer Unit [Электронный ресурс] // URL: https://support.cessna.com/docs/custsupt/techpubs/expertSystem/eSys750/eSys750-R1.0/eSysInfo/29ata/PTU/PTU.htm (Дата обращения: 10.11.2024).

5. CH47 Chinook [Электронный ресурс] // URL: https://www.eaton.com/Eaton/ProductsbyMarket/Government/Aerospace/CH47Chinook/index.htm (Дата обращения: 10.11.2024).
6. Фролов, Г.К., Пастухов, И.С., Калимуллин, Р.Р. «О гидравлических аварийных системах гражданских самолётов» [Электронный ресурс] // https://ugatu.su/media/winterSchoolSeminar/article/2021-09-21/O_GIDRAVLIChESKIKh_AVARIJNYKh_SISTEMAKh_GRAZhDAN_0HRArBf.docx (Дата обращения: 12.11.2024).
7. Гидравлические системы / Разбор ЛС ВС SSJ100. [Электронный ресурс] // URL: http://superjet.wikidot.com/wiki:hydro (Дата обращения: 13.11.2024).
8. Гидравлическая система самолёта [Электронный ресурс] // URL: https://avia.pro/blog/gidravlicheskaya-sistema-samoletan (Дата обращения: 13.11.2024).

© Бикмаева Д.С., Рахимова А.Р., 2024

УДК 622.242.2

Д.С. БИКМАЕВА, А.Р. РАХИМОВА
bikmaewa.di@yandex.ru
Науч. руководов. – доктор техн. наук, проф. В.А. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ БУРИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Аннотация: данная статья посвящена обзору универсального бурильного комплекса (УБК). В ней описывается область применения данных устройств, их комплектация, а также указаны основные производители УБК. Расписаны принципы работ различных платформ и имеющиеся недостатки универсального бурильного комплекса.
Ключевые слова: универсальный бурильный комплекс; бурение скважин в грунте; применение УБК; типы платформ; недостатки универсального бурильного комплекса.

Универсальные бурильные комплексы, в частности, используются для бурения скважин в грунтах I–IV категорий по строительным нормам и правилам (СНиП) IV–2–82 и установки в них опор при строительстве линий электропередач (ЛЭП), связи и т.д.

Применить универсальный комплекс можно в различных областях:

- бурение скважин под углом и в грунтах;
- установка опор при строительстве линий электропередач;

– возведение опор ЛЭП на сваях в фундаменте;
– работа в сложных ландшафтных условиях;
– внушительная рабочая зона, включающая несколько рабочих точек;
– широкий диапазон типоразмеров бурильного комплекса, которые подойдут для различных видов работ.

Универсальные бурильные комплексы включают в себя: автоплатформу; кран-манипулятор; универсальное буровое оборудование; аутригеры; инструмент для завинчивания свай. Бурение телескопической стрелы на вылете имеет ряд преимуществ перед мачтовым бурением:

– за счет стрелового оборудования происходит четкость позиционирования бурильного инструмента, и именно из-за этого отсутствует необходимость маневрирования базового автомобиля при наведении на точку;
– возможность наращивания бурильного комплекса и быстрая сменность;
– бурение под углом.

Типы платформ универсального бурильного комплекса делятся по принципу действия:

1) авто-платформа в основном используется в городе, где есть обычная дорога для возведения свайных фундаментов опор ЛЭП;
2) гусеничное шасси представляет собой оптимальный вариант для выполнения работ в условиях сложного ландшафта;
3) шасси-амфибия используется в болотистой местности, в которой другой не смогут работать.

Недостатки УБК с механическими распределителями: трудоемкость рабочего процесса; ручной режим управления; низкий уровень эргономики.

Недостатки УБК с механическими гидрораспределителями: работа универсального бурильного комплекса осуществляется несколькими операторами, чтобы исключить непроизвольное шнековое диагональное бурение, завинчивания свай.

Приведены несколько производителей, на наш взгляд у них более качественное оборудование, высокий рейтинг производительности. Большой выбор машин, буровых инструментов и запчастей к установкам.

1. Завод Стройдормаш. Стройдормаш – это быстро развивающееся предприятие, которое уже больше шестидесяти лет занимает ведущее место на рынке бурильно-кранового оборудования в России и странах СНГ.

Специализация предприятия: производство буровых установок; буровых машин; бурильно-крановых машин; сваебойных машин; малогабаритной буровой техники; дополнительного навесного оборудования.

2. Южнокорейская компания Soosan Heavy Industries была основана в 1984 году. Спустя несколько лет с момента начала работы организацией была получена лицензия на производство строительного оборудования. Их краны-манипуляторы могут быть с легкостью установлены на шасси, нет особой необходимости осуществлять демонтаж грузовой платформы.

3. Завод БурМаш начал работу с апреля 1999 года. Направления деятельности: ремонт бурильно-крановых установок; производство и реализация запасных частей, гидроцилиндров, гидромоторов, редукторов; производство и реализация буровых инструментов.

4. Kanglim – корейский производитель грузоподъемной техники, основанный в 1979 году. Их краны-манипуляторы выполняют работы различной сложности, что помогает обеспечить передвижение грузов при выполнении строительных работ, а также на общепромышленных предприятиях. Эта техника включает в себя функционирование автокрана и грузового транспорта.

Библиографический список

1. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. / М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

2. Башта, Т. М. Гидропривод и гидроавтоматика. / М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.

3. Классификация [Электронный ресурс] // URL: https://fb.ru/article/248877/kranovaya-burilnaya-mashina-opisanie-tehnicheskie-harakteristiki-i-otzyivyi.

4. Платформы [Электронный ресурс] // URL: https://www.e-маш.рф/tracked.

5. Завод «Стройдормаш» [Электронный ресурс] // URL: https://sdm-zavod.ru/about-us/.

6. Завод Soosan [Электронный ресурс] // URL: http://soosan.ru/.

7. Завод БурМаш [Электронный ресурс] // URL: https://zavod-burmash.ru/.

8. Завод Kanglim [Электронный ресурс] // URL: https://www.kanglim.msk.ru/.

© Бикмаева Д.С., Рахимова А.Р., 2024

УДК 630.36

Д.И. ГАЗИЗОВА, В.С. ПАВЛОВА
dgazizova026@gmail.com, *pavlotti14.10@gmail.com*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ
Уфимский университет науки и технологий

ФОРВАРДЕР – СПЕЦМАШИНА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕСОЗАГОТОВОК

Аннотация: в статье рассматривается форвардер как машина для сбора и перемещения заготовленной древесины, а также уделено внимание истории

создания трелевочного трактора, ставшего прототипом форвардера. Представлена классификация и выявлены основные характеристики спецмашины, проведен анализ преимуществ и недостатков форвардера. *Ключевые слова*: форвардер; лесозаготовка; гидравлический манипулятор; трелевочный трактор.

Раньше для лесоэксплуатации люди использовали железнодорожные пути и лошадей, которые перемещали вагонетки. Чуть позже лесоматериал транспортировали с использованием грузовых поездов. В 1945–1950 годах не существовало подходящей аппаратуры для транспортировки лесозаготовок, а имеющиеся тракторы были слишком неповоротливые и неприспособленные к передвижению по лесосеке. Заготовка леса была необходима, поэтому перед конструкторами была поставлена задача создать маневренный трелевочный трактор, способный передвигаться по лесной местности, то есть поверх пней, поваленных деревьев и веток.

Учитывая эти требования в 1948 году на Кировском заводе под руководством знаменитого танкостроителя, генерал-полковника, инженера Ж.Я. Котина был разработан и изготовлен первый в мире трелевочный трактор КТ-12. Трелевочный трактор – это трактор, способный выполнять транспортировку сложенных деревьев, хлыстов, сортиментов на погрузочную площадку [1].

Трактор, представленный на рис. 1, получил название КТ-12, обладал впечатляющими характеристиками: он весил 5,8 тонны, имел удельное давление на грунт всего 0,04 МПа и мог похвастаться высоким дорожным просветом в 50 сантиметров.

На этот трактор был установлен двигатель с газогенераторной установкой мощностью всего 37 лошадиных сил. Трансмиссия, заимствованная у боевых машин, обеспечивала отличную управляемость и устойчивость. Впервые на тракторе была применена рычажно-балансирная подвеска, что позволило увеличить его среднюю скорость без нагрузки до 10 км/ч при движении по ровной местности.

Для сбора пачки хлыстов КТ-12 был оснащен небольшой лебедкой с приводом от вала, которая располагалась за кабиной водителя. Кроме того, трактор отличался высокой проходимостью. Его производительность составляла от 25 до 30 кубометров древесины в смену при расстоянии трелевки в 500 м [1].



Рис. 1. Трелевочный трактор КТ-12[2]

Такой трактор и стал прототипом форвардера.

Форвардер – это спецмашина, предназначенная для сбора и транспортировки заготовленного сортимента (рис. 2) [3]. В наше время форвардеры являются спецмашинами, способными заготовить около 150-280 кубометров леса за смену. Форвардер состоит из погрузочного манипулятора и кузова. Кабина машиниста размещена на передней полураме. Такая машина способна осуществлять разнообразные задачи, включая сортировку, сбор, погрузку и перемещение заготовок. Все перечисленные функции форвардер выполняет за счет гидравлического манипулятора. В начале 1960-х годов в Швеции были разработаны первые опытные образцы форвардеров, которые представляли собой колёсные тракторы с изменённой конструкцией. В 1964 году началось серийное производство этих машин, в котором принимали участие американские компании [4].



Рис. 2. Форвардер

В настоящее время машины этого типа производятся заводом «Амкодор» (рис. 3) в Беларуси и его дочерним российским предприятием «Амкодор-Онего» (г. Петрозаводск), а также Петербургским машиностроительным заводом (ПМЗ), начавшим производство форвардера «СТАНИСЛАВ» в 2024 году [5], [6], и в этом же году компания «Трактородеталь» разработала форвардер, состоящий из российских комплектующих. Производство планируют начать в 2026 году, на данный момент проводится тестирование машины [7].



Рис. 3. Форвардер Амкодор [5]

Рассмотрим принцип работы форвардера (см. рис. 3). Захват и погрузка сортимента осуществляется с помощью гидроманипулятора, захватное устройство которого может вращаться вокруг своей оси, за счет этого погрузка материалов происходит достаточно быстро. Когда захваченный краном ствол окажется ровно на тележке, манипулятор отпустит его. Всеми движениями машины руководит оператор [4].

Гидроманипулятор может быть установлен на крыше кабины, в передней или задней части машины. Обычно на тяжелых и базовых моделях он находится в задней части, а на небольших в передней. Такая конструкция обеспечивает большую устойчивость во время погрузки, поскольку колебания устраняются по мере заполнения грузового отсека [8].

Существуют три основные классификации форвардеров. По типу шасси: колесный; колесный с возможностью установки резиновых гусениц; колесно-гусеничный. Колесная формула шасси: 4х4 (по одной оси на модуль); 6х6 (одна ось на энергетическом и две на технологическом модуле); 8х8 (по две оси на модуль). По типу конструкции грузового отсека: фиксированной ширины и трансформируемые (раздвижные).

Также машины условно делятся на три группы по грузоподъемности: легкие (до 10 т); средние (10–15 т); тяжелые (свыше 15 т) [9].

К основным характеристикам форвардера относятся: грузоподъемность, составляющая от 5 до 20 т; объем перевозимого сортимента 25 $м^3$; угол поворота манипулятора более 360°; вылет стрелы до 10 м; длина грузового отсека от 4 до 5,6 м; мощность форвардера 200–300 лошадиных сил [4].

Говоря о преимуществах спецмашины следует отметить, что форвардер заготавливает за смену 300 кубометров, что в 10 раз больше производительности трактора. Форвардер оснащен колесами, а не гусеницами, как трактор, что позволяет без труда транспортировать древесину по дорогам общего пользования. Грузоподъемность форвардера составляет в среднем 12000 кг, тогда как у трелевочного трактора 5600 кг. [2], [5].

Уделим внимание и недостаткам форвардера: не может работать на неподготовленных площадках, а также на площадках, имеющих уклоны, превышающие 10°, т.к. в противном случае нарушается устойчивость техники [5].

Задумываясь о перспективах развития форвардера можно рассмотреть увеличение его устойчивости на площадках уклоном более 10°, что позволит вести работу на неподготовленных участках.

Принципиальная гидравлическая схема форвардера (рис. 4) включает в себя: гидробак закрытого типа; регулируемый аксиально-поршневой насос Н, статическая характеристика которого представлена на рис. 5. Насос через фильтр Ф подает жидкость из гидробака к гидрораспределителю Р, далее в золотник, направляющий поток жидкости в гидроцилиндры Ц1 и Ц2, отвечающие за поворот манипулятора и выпуск стрелы. Рабочая жидкость, попадая в нижнюю часть поршня, создает давление, за счет которого оборудование приходит в движение, таким образом, при движении золотника гидроцилиндра Ц3 поворачивается рукоять форвардера, гидроцилиндр Ц5 осуществляет захват заготовок.

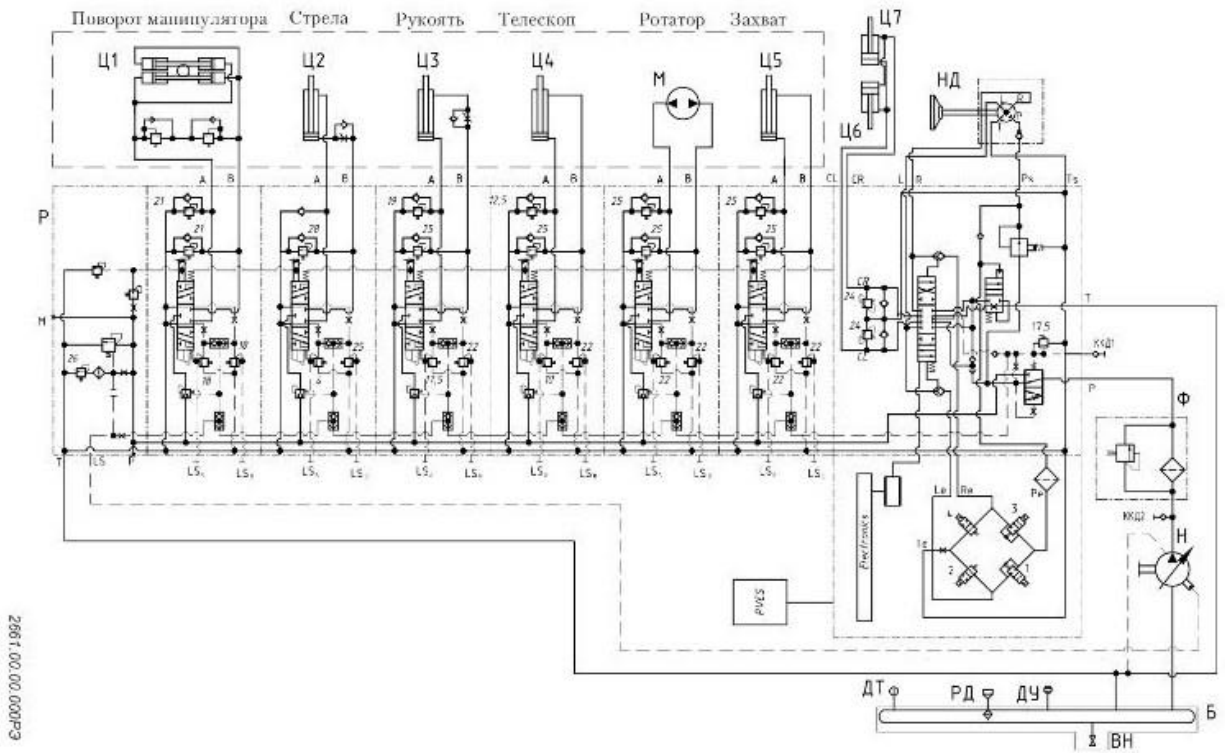


Рис. 4. Схема принципиальная гидравлическая форвардера [10]

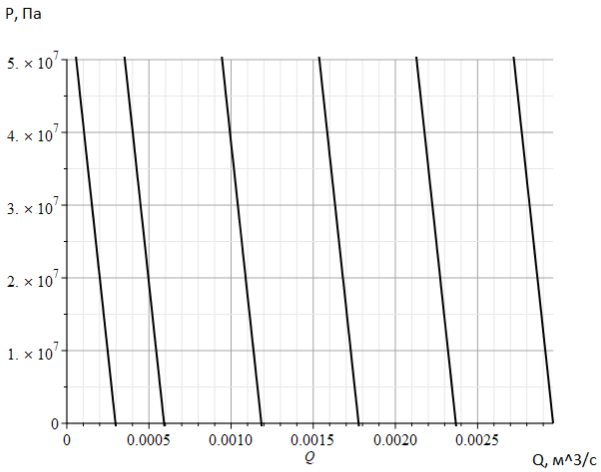


Рис. 5. Характеристика насоса

Подводя итог отметим, что в настоящее время форвардер является оптимальным вариантом спецтехники для сбора древесины, т.к. за относительно небольшой промежуток времени (8 часов) способен заготовить значительное количество сортимента.

Библиографический список

1. Долина [Электронный ресурс] // URL: Типы лесозаготовительных машин. Трелевочная машина.
2. Экскаваторы.Ру [Электронный ресурс] // URL: Характеристики КТ-12. Обзор трелевочного трактора, скиддера КТ-12 Кировец.
3. Восточная техника [Электронный ресурс] // URL: Форвардер (Forwarder): технические характеристики, виды.
4. СпецАвто [Электронный ресурс] // URL: Форвардер – что это? Виды и типы форвардеров.
5. Амкодор [Электронный ресурс] // URL: ООО «Амкодор-Онего» – Производитель лесозаготовительной техники в России.
6. ЛПК Сибири [Электронный ресурс] // URL: ПМЗ наладил производство форвардеров «СТАНИСЛАВ» – Журнал «ЛПК Сибири».
7. Трактородеталь [Электронный ресурс] // URL: Блог нашей компании / Traktorodetal.
8. Технополис [Электронный ресурс] // URL: Форвардер – ООО «Технополис» – Надежная техника – выбор профессионалов!
9. Effecom [Электронный ресурс] // URL: Харвестер и Форвардер, преимущества и недостатки.
10. [Электронный ресурс] // URL: https://amkodor-nw.ru/upload/iblock/f72/2661_2013.pdf?ysclid=m3fjyeqppz301579907.

© Газизова Д.И., Павлова В.С., 2024

УДК 630.36
Д.И. ГАЗИЗОВА
dgazizova026@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ТИПА «ХАРВЕСТЕР»

Аннотация: в статье рассматривается актуальность применения харвестера в лесозаготовке, также представлена история создания харвестеров и их классификация. Выявлены преимущества перед бригадой рабочих и сучкорезными машинами, также внимание уделено функциям харвестерной головки и принципу работы харвестера. Изучены особенности эксплуатации харвестеров и рынок производства. Выделены проблемы эксплуатации харвестера.
Ключевые слова: харвестер; харвестерная головка; комбайн; лесозаготовка; техническое обслуживание.

В настоящее время активно развивается автоматизация, а так как заготовка леса достаточно затратный и трудоемкий процесс, то необходима автоматизированная машина, например, харвестер, т.к. с его помощью значительно повысится производительность (150–300 кубометров в смену), тогда как бригада за смену заготавливает 50–120 кубометров в зависимости от количества рабочих и погодных условий, а обычная лесозаготовительная техника (сучкорезная машина) производит 0,35–0,8 кубометров в смену. Также сократится штат, т.к. для управления харвестером нужен всего один оператор, повысится безопасность работ, обеспечится низкая себестоимость леса, а также получится вести заготовку круглосуточно и заготавливать древесину в труднодоступных местах [2].

Первый комплекс машин для лесозаготовки в Советском Союзе был создан Карельским научно-исследовательским институтом лесной промышленности в 1984 году. Прототипом харвестера является сучкорезная машина, с помощью которой изначально разделывали хлысты. В дальнейшем ее соединили с валочной машиной. Тогда для управления получившимся комбайном требовалось два оператора, и для того, чтобы сократить трудозатраты и количество рабочих, была изобретена харвестерная головка, с помощью которой и сегодня осуществляется валка деревьев и складирование лесоматериала [3].

Харвестер – это комбайн для лесозаготовки, который обладает высокой проходимостью благодаря уникальной конструкции рамы: она сгибается не только пополам, но ещё и в плоскостях (рис. 1). Основным механизмом харвестера считается харвестерная головка, которая приводится в движение с помощью гидравлического оборудования. Эта головка содержит в себе несколько пил. Поперечная пила применяется для валки деревьев и резки, а другие для удаления веток и сучьев. Харвестер обхватывает ствол огромными ножами, пильные шины срезают дерево практически под корень, и дальше протяжными вальцами ствол протягивается и очищается от сучков и коры, а затем те же пильные шины отрезают части ствола того размера, который задан оператором.



Рис. 1. Харвестер [1]

Комбайн может эксплуатироваться в различных климатических условиях при температуре от + 40°С до – 30°С.

Благодаря харвестеру можно осуществлять валку деревьев, обрезку кроны, собирать готовый лесоматериал для его дальнейшей погрузки и транспортировки, кроме того, выполнять предварительные обмерные работы. Гидравлическая система обеспечивает выполнение основных функций манипулятора: вынос рабочего органа; захват и удержание спиленного дерева; раскладка спиленной древесины. Гидравлика, кроме того, обеспечивает работу тормозной системы и установку наклона кабины оператора [3].

Ходовая часть комбайна может состоять как из колес, так и из гусениц в зависимости от рельефа местности. Также существуют комбинированные шасси, использующиеся в тяжело проходимых местах.

Существуют харвестеры четырех классов в зависимости от диаметра дерева, который может обработать комбайн. Таким образом, выделяют: легкие харвестеры, предназначенные для очистки тонких хлыстов для прореживания, применяются в зеленом массиве городов; средние, служащие для заготовок строительного материала, диаметром 500 мм; тяжелые комбайны, использующиеся для валки в один приём; сверхтяжелые, эксплуатируются в глухих лесах, диаметр ствола дерева в которых составляет более 1 м [4].

Рассмотрим, каким образом приводится в работу харвестер: прежде всего оператор подводит харвестерную головку к стволу дерева, который захватывается вальцами и сучкорезными ножами. Срезав дерево, головка поворачивается горизонтально и, продвигая ствол вальцами, удаляет ветви. После этого дерево обрезается на компоненты заданной длины [4].

Харвестеру, как и другой технике, необходимо техническое обслуживание. Для того, чтобы комбайн не вышел из строя, нужно раз в смену проводить осмотр харвестера. В том числе не допускать загрязнения рабочей жидкости, так как в противном случае это приведет к отказу гидросистемы. Кроме того, следует уделять внимание обломкам, остающимся в гусеницах и шинах. Также, в зависимости от количества моточасов, проводят плановое обслуживание, которое длится два дня [5].

В России работало много машин зарубежных марок, но сейчас ушли все поставщики западного производства и прекратились поставки запчастей для машин. Поэтому российские предприятия начали производство агрегатов для харвестерных головок и самих харвестеров. Например, «Уральское конструкторское бюро транспортного машиностроения» занимается выпуском харвестерных головок и харвестеров на базе гусеничных экскаваторов собственной разработки. Также создаются харвестеры на Камском автозаводе, они представляют собой полноприводную машину с колесной формулой. К тому же, белорусская компания «АМКОДОР» занимается разработкой лесных машин. Вместе с тем запускаются совместные производства. Например, результатом российских и китайских специалистов стала специализированная

модель экскаватора, а также была разработана компанией «Техноком» харвестерная головка модели Т600 [6], [7].

Говоря о недостатках харвестера, можно обратить внимание на проблему гидросистемы, связанную с инерционными нагрузками и нерегулируемой частотой вращения пилы, что может привести к поломке, т.к. у деревьев разная плотность. Также возникает проблема тепловых режимов, связанная с тем, что насосная станция, бак и харвестерная головка находятся на значительном расстоянии друг от друга, что приводит к остыванию рабочей жидкости.

Таким образом, использование харвестера позволит вести заготовку леса в больших объемах, невзирая на погодные условия и особенности рельефа на участке работы, а также обеспечит безопасность работ, так как машина автоматизирована.

Библиографический список

1. Харвестер / [Электронный ресурс] // Яндекс картинки: [сайт]. – URL: https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fi.pinimg.com%2Foriginals%2Ff5%2F68%2F0a%2Ff5680a4df697057fb486707043e2a6f4.jpg&lr=172&pos=22&rpt=simage&text=%5Bfhdtcnth.

2. Infourok. Ru [Электронный ресурс] // URL: Презентация на тему: исследование рынка харвестеров (infourok.ru).

3. Спецтехника [Электронный ресурс] // URL: История создания хаарвестеров – Спецтехника – Каталог техники специального назначения (tpscom.ru).

4. Drevesina.net [Электронный ресурс] // URL: Харвестер: что это и для чего применяется. Управление харвестером (drevesina.net).

5. Itexn [Электронный ресурс] // URL: Техническое обслуживание и ремонт харвестеров и форвардеров (itexn.com).

6. [Электронный ресурс] // URL: Применение харвестера: плюсы и минусы (andreynoak.ru).

7. Lesprominform [Электронный ресурс] // URL: Лесозаготовительная техника в России. Реальность и перспективы (lesprominform.ru).

© Газизова Д.И., 2024

УДК 630.36

Д.И. ГАЗИЗОВА, С.Ю. КОНСТАНТИНОВ, В.С. ПАВЛОВА
dgazizova026@gmail.com, *konstserge@mail.ru*, *pavlotti14.10@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ МЕТОДОВ БОРЬБЫ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ УДАРОМ

Аннотация: рассмотрено понятие гидравлического удара. Выявлены основные причины возникновения, а также способы его устранения. Проведено сравнение двух патентов.

Ключевые слова: гидравлический удар; гидроудар; трубопровод; разрушение; изменение давления; трубопроводная система.

Гидравлический удар – волновое явление, представляющее собой кратковременное, но резкое и сильное повышение давления в трубопроводе при внезапном торможении жидкости в трубопроводе. Последствия после гидроудара – это разрушение трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры, и других элементов трубопроводной системы (рис. 1). Физическая причина гидравлического удара ударное преобразование кинетической энергии жидкости в потенциальную с последующим демпфированием жёсткой стенкой трубопровода в плохо сжимаемой среде.



Рис. 1. Последствия гидравлического удара

Впервые гидравлический удар был исследован и описан Н.Е. Жуковским в 1899 году в работе «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах» [1]. Ключевыми характеристиками гидроудара были определены:

1) скорость ударной волны c:

$$c = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho\left(\frac{E_{ж}}{E_{т}}\frac{d}{\delta}+1\right)}}, \quad (1)$$

где $E_{ж}$ – модуль упругости жидкости; $E_{т}$ – модуль упругости трубы; ρ – плотность жидкости; d – диаметр трубопровода; δ – толщина стенок трубы;

2) фазное время $t_{фаз}$:

$$t_{фаз} = \frac{2l}{c}, \quad (2)$$

где l – длина трубопровода до ближайшего разветвления или открытого участка.

В зависимости от времени закрытия трубопровода и конечной скорости движения жидкости гидроудар подразделяется на прямой, непрямой и полный, неполный (рис. 2).

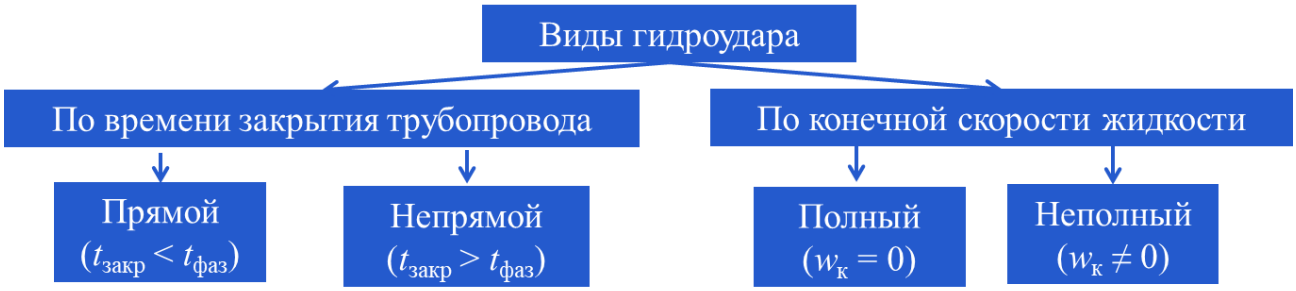


Рис. 2. Классификация видов гидроудара

Наиболее опасным в технике видом гидроудара является прямой полный гидроудар, т. е. время закрытия $t_{закр}$ меньше времени $t_{фаз}$, и конечная скорость гидроудара $w_к$ равна нулю. Повышение давления в трубопроводе Δp при этом будет [2]:

$$\Delta p = \rho c w, \quad (3)$$

где w – скорость движения жидкости в трубопроводе до гидроудара. При неполном гидроударе давление окажется ниже на величину конечной скорости жидкости $w_к$:

$$\Delta p = \rho c (w - w_к). \quad (4)$$

Для неполного непрямого гидроудара повышение давления станет ещё ниже за счёт влияния времени закрытия $t_{закр}$:

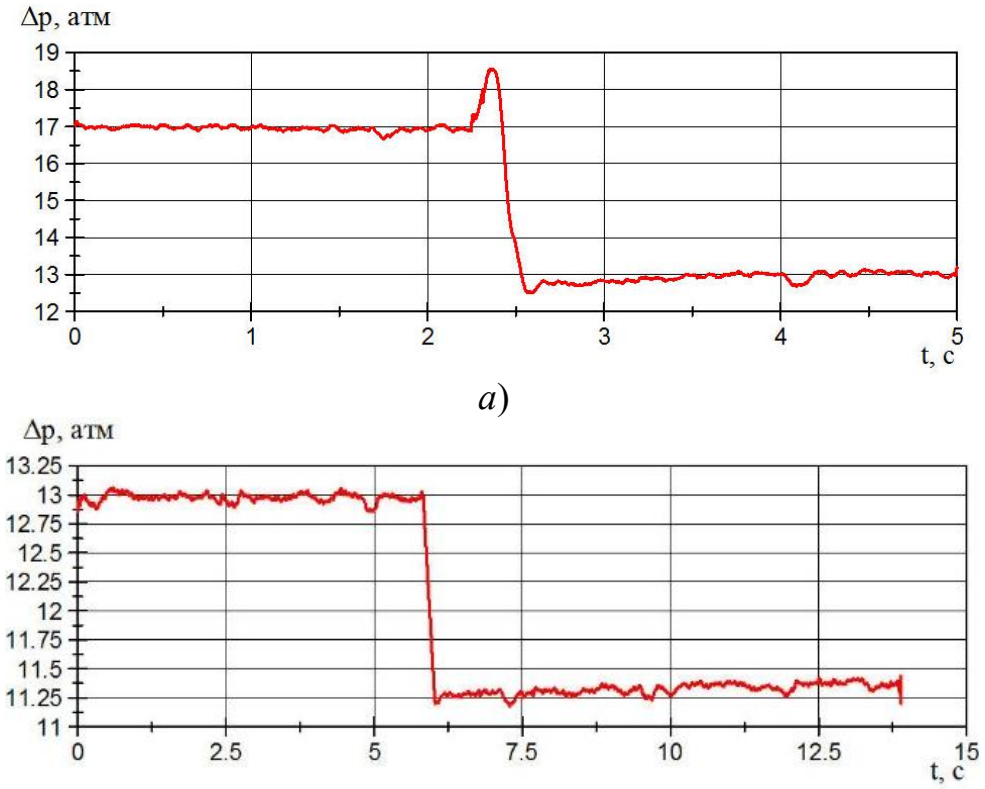
$$\Delta p = \rho c (w - w_к) \frac{t_ф}{t_{закр}}. \quad (5)$$

На основе теории Н.Е. Жуковского разработаны методы борьбы и принципы предотвращения гидроудара [3]: увеличение времени закрытия трубопровода: избегание полного закрытия трубопровода; уменьшение активной длины трубопровода; уменьшения модуля упругости трубопровода.

Увеличение времени закрытия трубопровода было предложено Н.Е. Жуковским и предполагает замену клапанной запорной арматуры на вентильную, что позволяет повысить время закрытия трубопровода выше фазного и тем самым предотвратить гидравлический удар (5). В настоящее время в подавляющем большинстве коммунальных трубопроводов применяется вентильная арматура с длительным временем закрытия.

Избегание полного закрытия трубопровода позволяет уменьшить влияние скорости жидкости на повышение давления при гидроударе (4) и применяется в случае, когда конструктивно увеличить время закрытия невозможно или нецелесообразно, например, в золотниковых гидрораспределителях. Пример влияния дренажа золотника гидрораспределителя на гидроудар приведён на рис. 3.

На рис. 3, *а* испытывается распределитель без дренажа, и при переключении возникает характерный заброс давления (гидроудар), который гасится гибкими трубопроводами. На рис. 3, *б* испытывается распределитель с постоянным дренажем золотника, и при переключении характерного заброса давления не наблюдается.



а)

б)

Рис. 3. Экспериментальные динамические характеристики по давлению трёхпозиционного распределителя, полученные на стенде «Диагностика и идентификация гидросистем»: *а*) – без дренажа золотника; *б*) – с дренажом

Уменьшение активной длины трубопровода предполагает отказ от древовидных трубопроводных систем в пользу кольцевых и приводит к уменьшению фазного времени (2). Гидроудар, возникший на ветке кольцевого трубопровода, гасится непосредственно кольцом жидкости и циркуляционным насосом. Данный метод активно применяется в коммунальном хозяйстве, питьевом водоснабжении и теплоснабжении.

Уменьшение модуля упругости трубопровода и жидкости конструктивно реализуется установкой в трубопровод гидроаккумуляторов и применением гибких, спирально завязанных трубопроводов, что позволяет понизить скорость ударной волны (1) в несколько раз и, соответственно, последствия гидроудара.

Расчёт напряжений в трубопроводе на прочность при гидроударе производится по формулам:

$$\sigma = \frac{(p_0 + \Delta p)d}{2\delta} - \text{для стенки,} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{(p_0 + \Delta p)d}{4\delta} - \text{для торца.} \quad (7)$$

Анализ формул (6) и (7) показывает, что наиболее вероятной точкой разрушения трубопровода будет стенка, а не торец, поэтому для повышения прочности трубопроводов применяется армирование и цельное вытяжение.

Существует некоторое количество патентов с технологическими решениями смягчения, гашения и уменьшения последствий гидравлического удара. При их исследовании выделены два наиболее интересных варианта, которые хотелось бы сравнить между собой.

Патент RU 221778 U1. Устройство для гашения гидравлического удара. Владелец патента: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»). Автор: Хомутов М.П.

Полезная модель (рис. 4) относится к вспомогательному оборудованию гидравлических трубопроводов, а именно к устройствам для защиты трубопроводов пищевого и непищевого назначения путем гашения пульсаций давления в трубопроводах, в частности путем гашения гидравлических ударов, и может быть использована для повышения надежности различных гидросистем. Техническим результатом полезной модели является повышение эффективности работы.

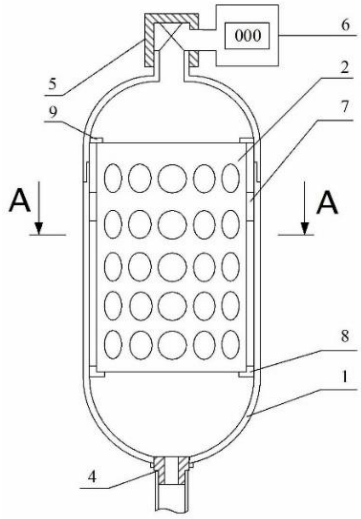


Рис. 4. Конструкция устройства для гашения гидравлического удара

Технический результат достигается тем, что устройство для гашения гидравлического удара состоит из герметичной емкости, снабженной сферическими элементами, выполненными из полиуретана, покрытыми полиэтилентерефталатной пленкой и заполненными инертным газом, и соединенной с трубопроводом посредством запорной арматуры, при этом герметичная емкость установлена перпендикулярно напорному трубопроводу.

В верхней части герметичной емкости дополнительно посредством присоединительного штуцера установлен блок анализа газа, отличающийся тем, что устройство снабжено цилиндрическим, перфорированным картриджем, внутри которого находятся сферические элементы, а картридж расположен внутри разборного корпуса, который выполнен из двух частей, зафиксированных резьбовым соединением для удобства замены картриджа со сферическими элементами, при этом цилиндрический картридж может быть сетчатым [4].

Патент SU 90110 A1. Задвижка, смягчающая гидравлический удар. Автор: Сафонов Г.А. Предметом изобретения является задвижка (рис. 5), смягчающая гидравлический удар. Известные задвижки, применяемые в жидкостных системах и снабженные запорным органом в виде диска, не исключают возникновения гидравлических ударов в сети при закрывании задвижек. В описываемой задвижке этот недостаток устранен.

Особенность предлагаемой задвижки состоит в том, что в целях смягчения гидравлического удара при ее закрывании запорный орган выполнен в виде трех дисков, из которых средний имеет отверстия для прохода среды и при закрывании задвижки опережает крайние диски. [5]

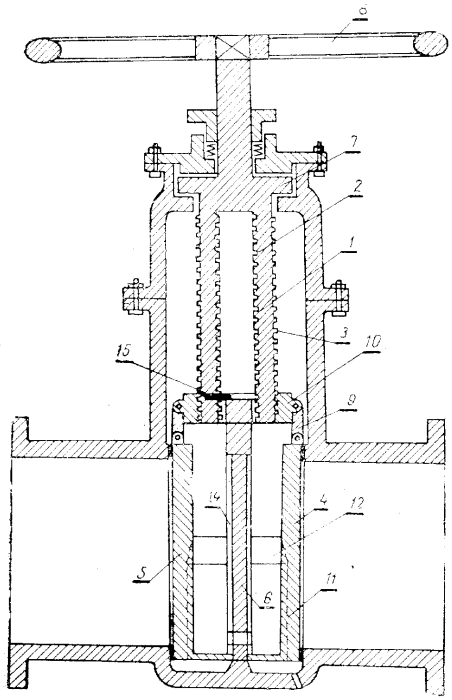


Рис. 5. Задвижка в продольном разрезе

При сравнении двух данных патентов можно сделать вывод о том, что устройство для гашения гидравлического удара более трудозатратно при изготовлении, а также требует больших расходов финансов и времени. Задвижка, смягчающая гидравлический удар, является более простой в

изготовлении, а также имеет простой и понятный способ применения, однако автор не утверждает о полной безопасности от гидравлического удара.

Библиографический список

1. Жуковский, Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М., МВТУ, 1899. – 15 с.
2. Кудинов, А.А. Гидрогазодинамика: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 336 с.
3. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Вильнер Я.М., Ковалёв Я.Т., Некрасов Б.Б. и др. – Мн.: Высш. шк., 1985. – 382 с.
4. Патент RU 221778 U1. Автор: Хомутов М. П.
5. Патент SU 90110 A1. Автор: Сафонов Г. А.

© Газизова Д.И., Константинов С.Ю., Павлова В.С., 2024

УДК 629.3.027.74

Р.Н. ГАРЕЕВ
gareevramil61@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

ГУСЕНИЧНЫЙ МИНИ-ПОГРУЗЧИК

Аннотация: в этой статье рассматривается гидросистема гусеничного мини-погрузчика. Представлена гидросхема, а также расчеты гидроцилиндра и выявление основных проблем.
Ключевые слова: гусеничный мини-погрузчик; гидросистема; гидравлический привод; гидросхема; гидроцилиндр.

Гусеничные мини-погрузчики (рис. 1) широко применяются в различных отраслях, таких как строительство, сельское хозяйство и коммунальные услуги, благодаря своей универсальности и высокой проходимости. Одним из ключевых компонентов, определяющих производительность и надежность этих машин, является их гидравлическая система. Гидросистема обеспечивает выполнение множества рабочих операций: управление движением; подъем и перемещение грузов; работу навесного оборудования.

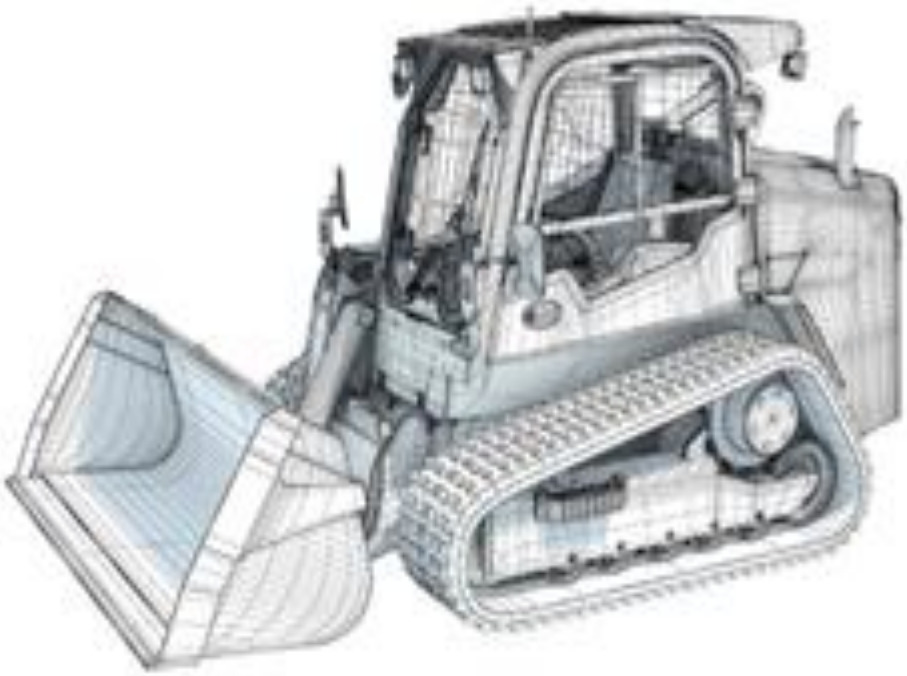


Рис. 1. Гусеничный мини погрузчик [1]

В гидравлических системах гусеничного мини-погрузчика могут возникнуть несколько основных проблем:

1. Утечки жидкости: это может происходить из-за износа уплотнений, повреждения шлангов или соединений. Утечка приводит к снижению давления в системе, что ухудшает работу погрузчика.

2. Загрязнение жидкости: появление загрязняющих частиц в гидравлической жидкости может вызвать повреждение насосов и цилиндров. Регулярная замена и фильтрация жидкости необходимы для предотвращения этой проблемы.

3. Поломка насоса: насосы могут выйти из строя из-за серьезных механических повреждений или износа. Проверка и замена насоса важны для поддержания устранения проблемы с поднятием грузов.

4. Неисправности управления: в системе управления могут быть неисправности, такие как отказ клапанов или неисправные датчики. Эти сбои могут привести к неправильной работе системы.

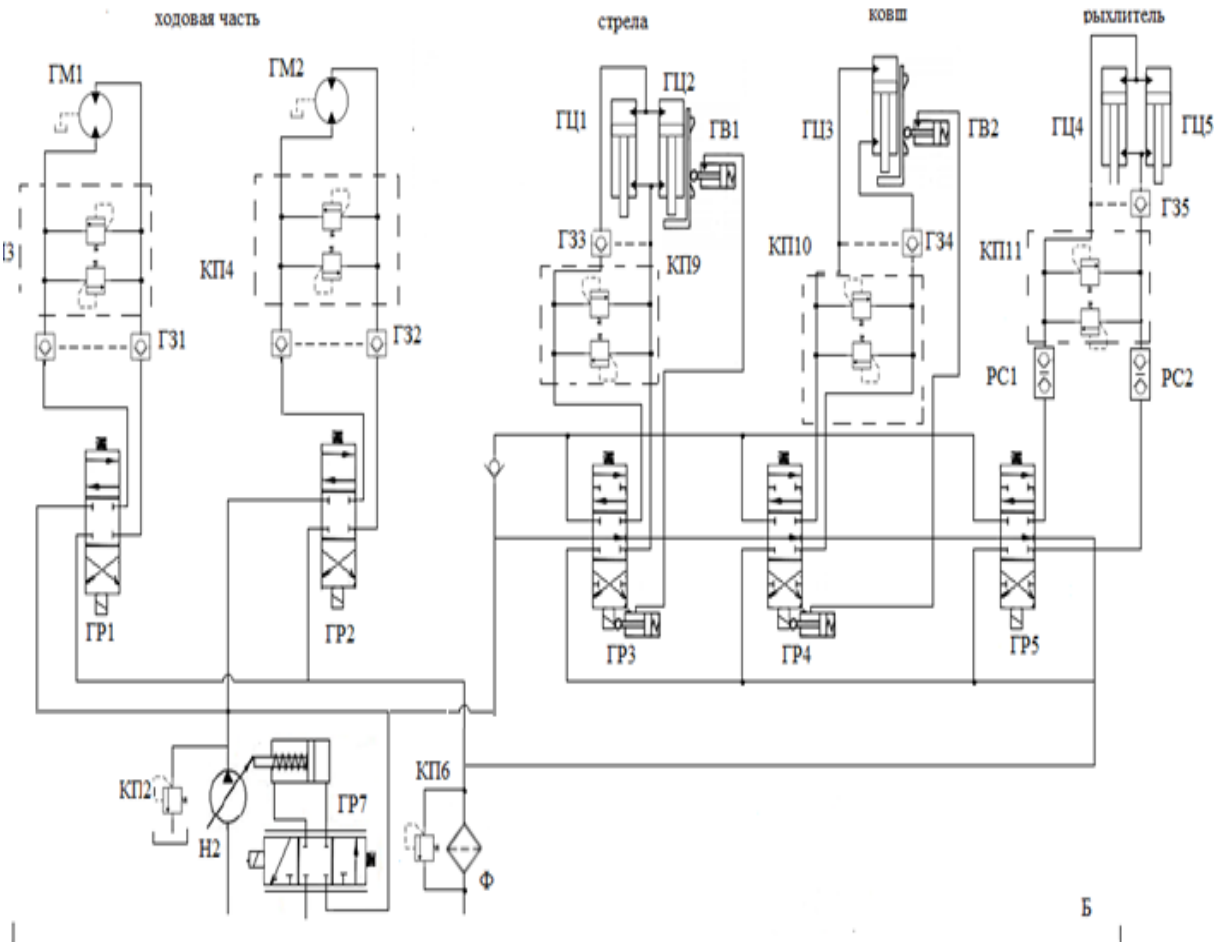


Рис. 2. Схема принципиальная гидравлическая гусеничного мини-погрузчика

Стрела погрузчика и ковш приводятся в действие с помощью однопоршневого гидроцилиндра двухстороннего действия (рис. 3) [2].

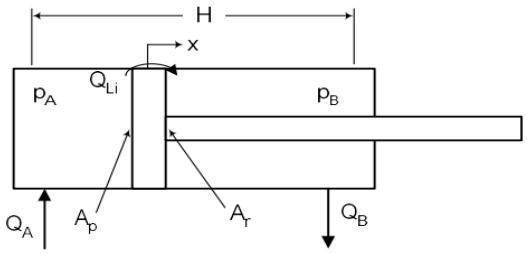


Рис. 3. Гидравлический цилиндр [2]

Усилие в приводе создается за счет разности давлений в цилиндре. Уравнения нарастания давления для линейного привода выражаются следующим образом:

$$\dot{p}_A = \frac{1}{c_{H_A}} * \left[Q_A - A_p \dot{x}_{cyl} - k_L * (p_A - p_B)\right];$$

$$\dot{p}_B = \frac{1}{C_{H_A}} * \left[-Q_B - \alpha A_p \dot{x}_{cyl} + k_L * (p_A - p_B)\right];$$

где α – отношение площадей цилиндров, учитывающее дифференциальную площадь цилиндра с одним штоком, и выражается как $\alpha = \frac{A_p - A_r}{A_p}$; C_{H_A} и C_{H_B} – гидравлическая емкость для объема цилиндра; k_L – представляет собой коэффициент утечки жидкости, зависящий от внутреннего давления между двумя сторонами цилиндра; p_B – внешнее давление, действующее на поршень.

Уравнение баланса сил используется для расчета чистой силы цилиндра, которая затем передается в кинематическую модель для получения положения и скорости поршня. Чистая сила, оказываемая цилиндром, моделируется уравнением:

$$F_{\text{net}} = A_p(p_A - \alpha p_B) - F_f - F_{\text{stop}},$$

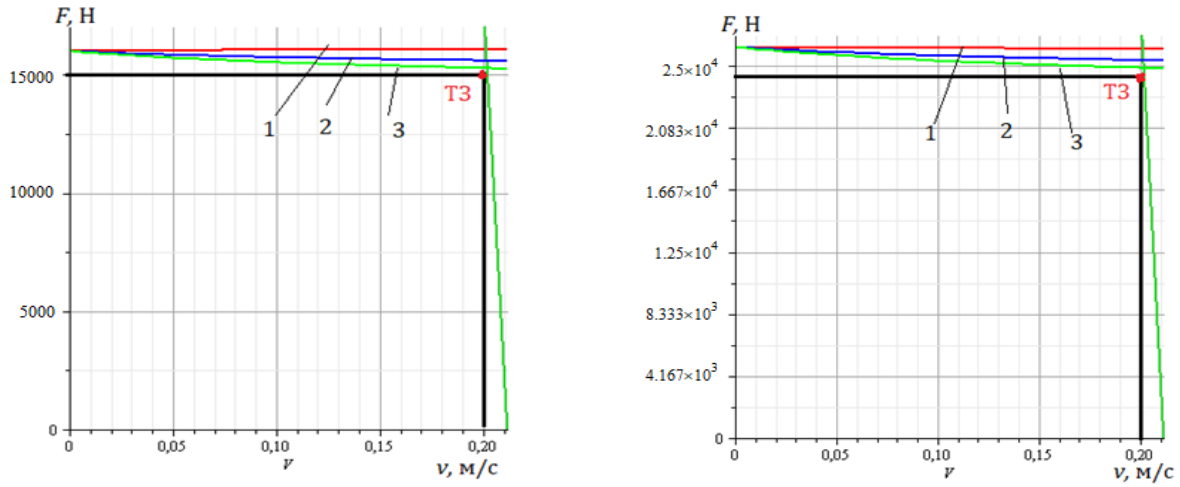
где F_f – сила трения, определяемая с помощью уравнения Штрибека.

$$F_f = f_c \text{sign}(\dot{x}) + f_v \dot{x} + f_s e^{-\tau_s |\dot{x}|} \text{sign}(\dot{x}),$$

где эффективная сила трения представляет собой сумму кулоновского (сухого), вязкого и статического трения. F_{stop} учитывает тот факт, что поршень может пройти только конечное расстояние до столкновения с концами цилиндра. Это ограничение было смоделировано с помощью следующей кусочной функции:

$$F_{\text{stop}} = \begin{cases} -k_{\text{end}} x - d_{\text{end}} \dot{x}, & x < 0 \\ 0, & 0 \le x \le H \\ k_{\text{end}}(H - x) - d_{\text{end}} \dot{x}, & x > H \end{cases}.$$

Получаются такие характеристики гидроцилиндра стрелы и ковша (рис. 4).



а) стрела *б*) ковш

Рис. 4. Характеристики гидроцилиндра стрелы и ковша

Гусеничные мини-погрузчики являются высокоэффективными машинами, широко применяемыми в строительстве, сельском хозяйстве и

коммунальном хозяйстве благодаря своей универсальности и надежности. Одним из основных узлов, определяющих производительность и эксплуатационные характеристики данной техники, является гидравлическая система. Ее изучение и анализ остаются актуальными в связи с необходимостью повышения эффективности работы и продления ресурса эксплуатации оборудования.

В данной статье приведен расчет гидравлических потерь в гидроцилиндре стрелы и ковша гусеничного мини-погрузчика. Результаты расчёта подтверждают важность минимизации гидравлических потерь в данной гидросистеме.

Библиографический список

1. Гусеничный мини-погрузчик [Электронный ресурс] // URL: https://3dmodels.org/3d-models/mini-tracked-skid-loader / (дата обращения: 12.11.2024).

2. Advanced hydraulic systems for next generation of skid steer loaders [Электронный ресурс] // URL: https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/981/ (дата обращения: 12.11.2024).

© Гареев Р.Н., 2024

УДК 629.7.062.5

Р.Р. ГАРЕЕВ
gareev.rudel@gmail.com
Науч. руководит. – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

РУЛЕВОЙ ПРИВОД РУЛЯ ВЫСОТЫ ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЁТА

Аннотация: в этой статье рассматривается гидропривод руля высоты гражданского самолёта. Описаны основные термины. Приведен динамический расчет гидропривода.
Ключевые слова: руль высоты; гидропривод; схема.

Руль высоты – это элемент управления в авиации, который используется для изменения угла атаки самолета, тем самым регулируя его подъемную силу и угол наклона носа. Он позволяет пилоту изменять вертикальное положение воздушного судна: поднимать или опускать нос.

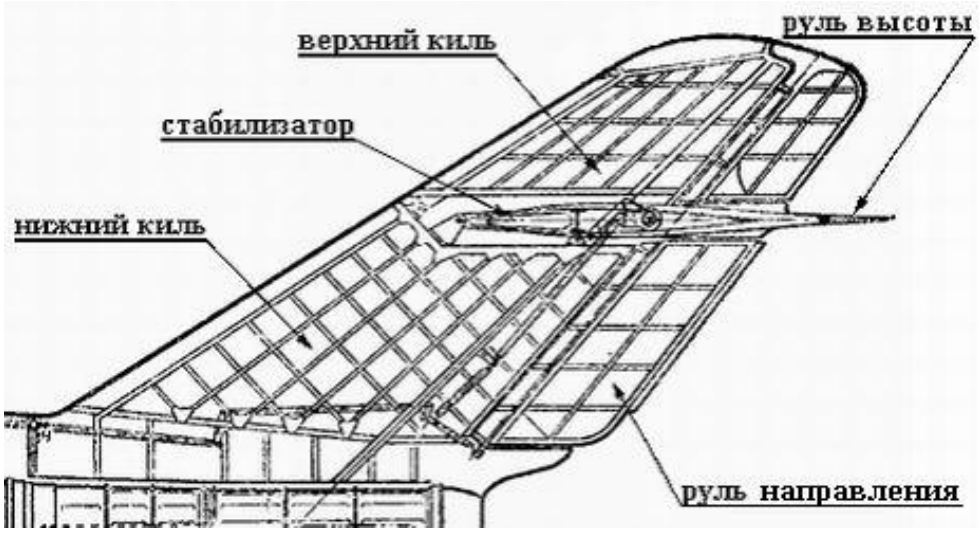


Рис. 1. Расположение руля высоты [1]

Гидравлический привод руля высоты (ГПРВ) является важной частью системы управления самолетом. Однако, несмотря на свою важность, гидравлические системы могут сталкиваться с рядом проблем. Вот некоторые из них:

1. Утечки жидкости. Утечки гидравлической жидкости в системе могут привести к снижению давления, что, в свою очередь, может вызвать ухудшение работы привода. Утечка также может привести к недостаточному смазыванию и перегреву компонентов.

2. Низкое давление в системе. Снижение давления в гидравлической системе может привести к недостаточному усилию на руле.

3. Кавитация. В случае пониженного давления в насосах и трубопроводах может возникнуть кавитация, образование пузырьков газа, которые при сжатии создают ударные волны. Это может привести к эрозии компонентов системы и привести к снижению её эффективности.

4. Невозможность ручного управления в случае отказа. В случае отказа гидравлической системы, если не предусмотрены резервные механизмы или электромеханические приводы, пилот может не иметь возможности вручную контролировать руль высоты.

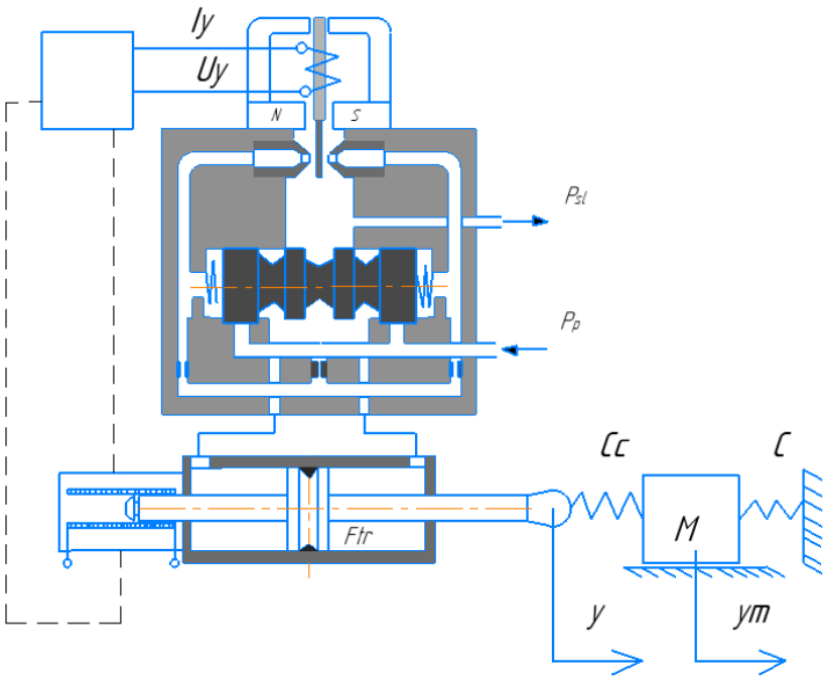


Рис. 2. Расчётная схема рулевого привода [2]

Расчёт динамики

Уравнение электрической цепи:

$$U_v - K_{oc2}Y(t) = L \cdot \frac{d}{dt} I_y(t) + R_{om} \cdot I_y(t) + Kpel \cdot \frac{d}{dt} \alpha_1(t),$$

где U_v – напряжение, В; K_{oc2} – коэффициент главной обратной связи, В/м; L – индуктивность, Гн; R_{om} – активное сопротивление управляющей обмотки, Ом; $Kpel$ – коэффициент, учитывающий сжимаемость жидкости на ГЦ.

Сумма моментов на якорь ЭМП:

$$J_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \alpha_1(t) = K_{mi2} \cdot I_y(t) - K_{ma} \cdot \alpha_1(t) - be \cdot \frac{d}{dt} \alpha_1(t),$$

где J_1 – момент инерции якоря ЭМП, Н·м·с2; K_{mi2} – коэффициент моментной характеристики, Н·м/рад; K_{ma} – коэффициент крутизны механической характеристики, Н·м/рад; be – коэффициент вязкого демпфирования ЭМП, Н·м·с/рад.

Уравнение баланса расходов ГУ:

$$K_{Qh} \cdot h(t) - K_{qp} \cdot P_z(t) = A_{zol} \cdot \frac{d}{dt} x_1(t) + \frac{V_k \cdot \frac{d}{dt} P_z(t)}{2 \cdot E_k},$$

где K_{Qh} – коэффициент усиления по расходу, м^3/с; K_{qp} – коэффициент скольжения по давлению, м^3/сПа; A_{zol} – площадь торцов золотника, м^2; V_k – объём полости золотника, м^3; E_k – модуль объёмной упругости, Па.

Уравнение движения золотника:

$$m_{zol} \cdot \frac{d^2}{dt^2} x_1(t) = P_z(t) \cdot A_{zol} - C_{zol} \cdot x_1(t) - be \cdot \frac{d}{dt} x_1(t),$$

где m_{zol} – масса золотника, кг; C_{zol} – жёсткость торцевых пружин золотника, Н/м.

Уравнение баланса расходов через дроссель:

$$\mu \cdot b_{ok} \cdot x_1(t) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \left| \frac{P_p - P_d(t) \cdot \mathrm{sig}(x_1(t)) - P_{cl})}{2} \right|} = A_{zol} \cdot \frac{d}{dt} Y(t) + \frac{W \cdot \frac{d}{dt} P_z(t)}{2 \cdot E_k},$$

где μ – коэффициент расхода в золотниковом распределителе; b_{ok} – ширина окна распределителя, м; ρ – плотность, кг/м^3; P_p – давление питания, Па; P_{cl} – давление слива, Па; W – объём рабочей жидкости в камере ГЦ, м^3.

Уравнение движения поршня ГЦ:

$$M \cdot \frac{d^2}{dt^2} Y(t) = A \cdot P_d(t) - R - be \cdot \frac{d}{dt} Y(t) - F_{tr} - C_n \cdot Y(t),$$

где M – приведённая масса нагрузки, кг; A – эффективная площадь ГЦ, м^3; R – нагрузка, Н; F_{tr} – сила сухого трения поршня, Н; C_n – позиционная нагрузка, Н/м.

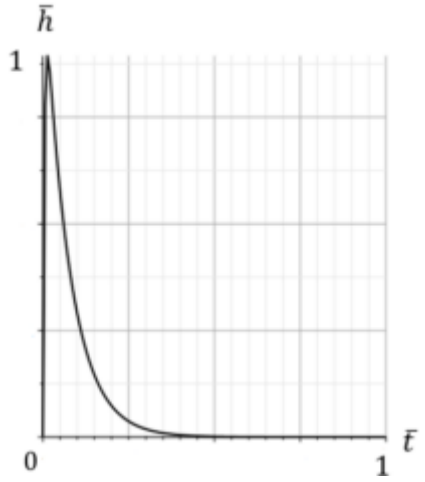


Рис. 3. Перемещение заслонки [2]

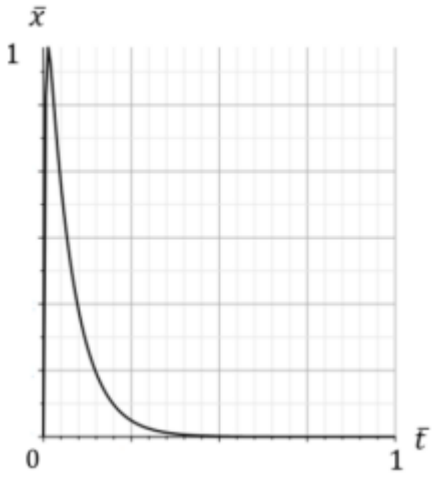


Рис. 4. Перемещение золотника [2]

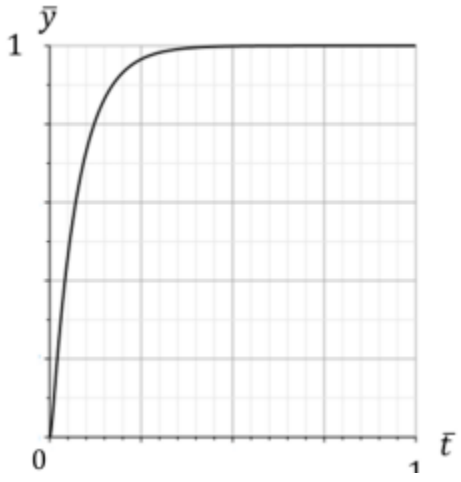


Рис. 5. Перемещение штока гидроцилиндра [2]

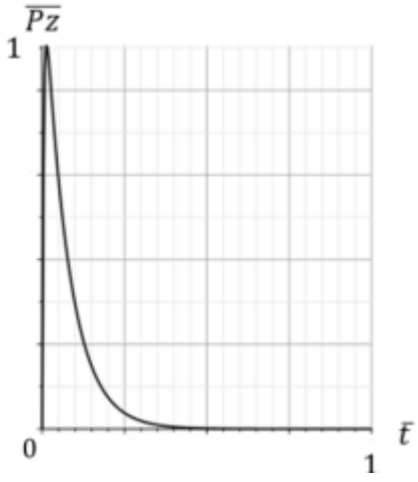


Рис. 6. Перепад давления в полостях гидроцилиндра [2]

Гидропривод руля высоты является основным элементом системы управления самолёта, обеспечивает точную и эффективную корректировку угла атаки.

Однако несмотря на преимущества, рулевые приводы могут столкнуться с рядом проблем. В данной статье приведён расчет динамических характеристик гидропривода руля высоты. Получены графики переходных процессов.

Библиографический список

1. Руль высоты [Электронный ресурс] // URL: https://avia.pro/blog/rul-vysoty (дата обращения: 15.11.2024).
2. Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. XXVI Международная научно-техническая конференция (Москва, 07 декабря 2022 г.) // Сборник трудов конференции – М.: Мир науки, 2022.

© Гареев Р.Р., 2024

УДК 621.22

А.О. ГРАЧЕВ, Д.Ф. МУКМИНОВ
dinarmk59305@mail.ru
Науч. руководит. – канд. техн. наук, доцент Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

МИКРОГИДРАВЛИКА В ПРИМЕНЕНИИ И В ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация: в статье рассматривается вопрос применения и развития технологий микрогидравлики. Отмечены основные характеристики микрогидравлики: небольшие размеры компонентов; небольшой расход жидкости; высокое давление. Проведен обзор именитых компаний по изготовлению миниатюрных гидравлических оборудований.
Ключевые слова: гидравлическая система; микрогидравлика; высокая точность; микронасос; микродвигатель; пробоотборник; миниатюрная система.

Микрогидравлика – это область, которая занимается разработкой и применением миниатюрных гидравлических систем, работающих с очень маленькими объемами жидкости. Она используется в тех случаях, когда требуется высокая точность, малый размер и минимальный вес устройств. Обладает теми же свойствами, что и стандартная гидравлика, а именно передачей механической энергии путем движения гидравлической жидкости под высоким давлением.

По сравнению со стандартными решениями микрогидравлика позволяет выполнять многочисленные поставленные задачи с наименьшими расходами (от нескольких миллилитров в минуту до нескольких литров в минуту) и малыми габаритами гидравлического оборудования. Широко применяется в медицине, в робототехнике, в аэрокосмической и нефтяной промышленности. Микрогидравлика позволяет передавать большие усилия в ограниченных пространствах, что делает ее идеальной для применения в компактных устройствах.

Оборудования для микрогидравлики

Мир техники и инженерных решений движется в сторону миниатюризации и повышения эффективности. Одним из важных направлений этого процесса является разработка и производство гидрооборудования, применение которого позволяет сделать компактные гидравлические системы.

Изготовлением миниатюрных оборудований занимаются нижеперечисленные компании.

Bieri Hydraulik, подразделение *Hydac International*, Швейцария, изготавливающая стандартные версии миниатюрных аксиальных поршневых насосов типа *AKP* с тремя или пятью плунжерами. Габариты микронасосов *AKP* не превышают 36 мм в диметре и 99 мм по длине. Имеют следующие характеристики: рабочий объем от 0,3 до 0,36 $см^3$; максимальная скорость вращения вала до 5000 об/мин; максимальное давление до 350 бар.

Небольшие оборудования используются в морских и нефтегазовых отраслях, в системах дозирования и в общих гидравлических системах с небольшим рабочим объемом.

Hydro Leduc, Франция, изготавливающая: ряд миниатюрных насосов с регулируемыми рабочими объемами; миниатюрные моторы (скорость от 350 до 6500 об/мин); обратные, предохранительные, электромагнитные и пилотные клапаны; комплектные микрогидравлические установки для работы в самых разных условиях [2].

The Lee занимает лидирующие позиции в сфере миниатюрных технологий управления жидкостями, производит компоненты, в том числе компенсационные пробки, электромагнитные клапаны, ограничители расхода, защитные экраны, обратные и предохранительные клапаны. Один из основных продуктов регулятор расхода, который обеспечивает дозированный расход в одном направлении и свободный расход в противоположном направлении [2]. В самом маленьком размере диаметр составляет всего 4,5 мм, но номинальное давление в системе может достигать 20 МПа.

Takako Industries, подразделение *KYB Group*, Япония, заявляет, что изготавливает самый маленький в мире аксиально-поршневой насос. Насос *TFH*-040 имеет размеры всего 30 мм в ширину и 77 мм в длину и рассчитан на максимальное рабочее давление около 140 бар. Рабочий объем составляет 0,4 $см^3$/об, входная скорость до 2000 об/мин, расход 0,8 л/мин [2]. По данным компании характерные области применения включают насосы для управления

клапанами, оборудование для переключения пресс-форм на формовочных машинах, обжимные прессы и гидравлические зажимы.

Parker Hannifin – американская компания, производитель гидравлического оборудования, выпускающая стандартные версии гидромоторов и гидронасосов типа *PGP*505 и *PGM*511, максимальное давление которых 275 бар, максимальная частота вращения вала 4000 об/мин, масса гидрооборудования составляет от 2,22 кг и выше.

Применение микрогидравлики в нефтяных оборудованиях

Микрогидравлика находит применение в нефтяной промышленности, особенно в скважинных оборудованиях. Микрогидравлическая система в пробоотборнике пластового флюида обеспечивает стабильное управление давлением для получения точных образцов флюида без их загрязнения. Основным преимуществом микрогидравлики является уменьшение массы и габаритов конструкции пробоотборника, так как скважины имеют ограничения диаметром до 325 мм. Благодаря использованию жидкостей под высоким давлением микрогидравлические системы занимают меньше места по сравнению с традиционными механическими системами. Это особенно важно при работе в ограниченном пространстве скважины.

В состав пробоотборника входят следующие модули (рис. 1.):

- модуль гамма-каротажа и силовой электроники;
- гидравлический модуль;
- модуль фиксации и расфиксации прибора;
- модуль телеметрии;
- модуль отбора и хранения качественных проб флюида [6].

В комплект гидравлического модуля входят: насосная станция; электрогидравлический распределитель; предохранительный капана; фильтр. Модуль создан для формирования давления в полостях гидравлических цилиндров, отвечающих за фиксацию и расфиксацию, отбор проб и их хранение.

Микрогидравлику используют для контроля над клапанами, миниатюрными гидроцилиндрами и гидромоторами. Это позволяет обеспечить точное управление процессом отбора пробы без необходимости использования громоздких механических систем.

Использование микрогидравличеких систем позволяет снизить вес пробоотборников и уменьшить потребление энергии, что делает их более эффективными и экономичными в эксплуатации.

Благодаря уменьшенным размерам компонентов микрогидравлика позволяет разместить больше функциональных элементов в пределах ограниченного объема и диаметра пробоотборника. Это повышает функциональность устройства без увеличения его габаритов.

Микрогидравлика представляет собой потенциал для улучшения и автоматизации механизмов за счет уменьшения массогабаритных характеристик. Применение микрогидравлических систем позволяет достичь

точного управления процессами, повышения производительности и снижения затрат на ресурсы. Микрогидравлика, в отличие от стандартной гидравлики, способствует уменьшению расхода гидравлической жидкости в системе и повышению давления при тех же мощностях.

Микрогидравлика позволяет получать значительный прирост силы от миниатюрного источника энергии в небольшом пространстве. Таким образом может стать простым решением проблем, которые зачастую выходят за рамки традиционных механических решений.

Библиографический список

1. Сокол, В.А. Улучшение эффективности сельскохозяйственной техники с помощью микрогидравлики. / В.А. Сокол, И.Д. Модонов // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 23-24 ноября 2023 г. – Минск: БГАТУ, 2023. – С. 149–152.

2. Кен Коран. Что такое микрогидравлика и где она используется. / Электронный ресурс URL: https://www.fluidpowerworld.com/what-is-microhydraulics-and-where-is-it-used/ (дата обращения 16.11.2024).

3. HUDAC. / Электронный ресурс URL: https://www.hydac.com/en/hydac-load-sensing-main-control-valves/ (дата обращения 16.11.2024).

4. HYDRO LEDUC. / Электронный ресурс URL: https://hydroleduc.com/about-us/?lang=en (дата обращения 16.11.2024).

5. THE LEE COMPANY. / Электронный ресурс URL: https://www.theleeco.com/ (дата обращения 16.11.2024).

6. Пробоотборник пластового флюида. / Ш.Р. Галлямов, О.М. Дубровин, А.В. Месропян, К.А. Хисматуллин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16, № 5(50). – С. 121–127. – EDN PWZTGH.

© Грачев А.О., Мукминов Д.Ф., 2024

УДК 621.22

А.О. ГРАЧЕВ, Д.Ф. МУКМИНОВ
grachevalex2002@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРОТЕЗЫ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация: в статье представлен обзор протезов нижних конечностей с функцией активного демпфирования зарубежных и российских компаний.

Рассматриваются текущие достижения в области микрогидравлического протезирования.

Ключевые слова: протезы; гидравлический привод; микрогидравлика; микрогидравлические системы; протезы нижних конечностей с активным демпфированием.

Современные технологии протезирования нижних конечностей направлены на повышение функциональности, удобства и интеграции протезов в повседневную жизнь людей. Из существующих приводных механизмов выделяются микрогидравлические системы с активным демпфированием, которые обеспечивают высокую точность управления силовой поддержки, демпфирование нижних конечностей.

Протезы нижних конечностей классифицируются по нескольким основным критериям (рис. 1).



Рис. 1. Классификация протезов нижних конечностей

Компаниями, которые исследуют полностью активное гидравлическое демпфирование, являются Ottobock, Ossur, Blatchford, C-Leg, Rel-K. Их исследования направлены на улучшение демпфирования и интеллектуальных систем управления (рис. 2–5) [6].

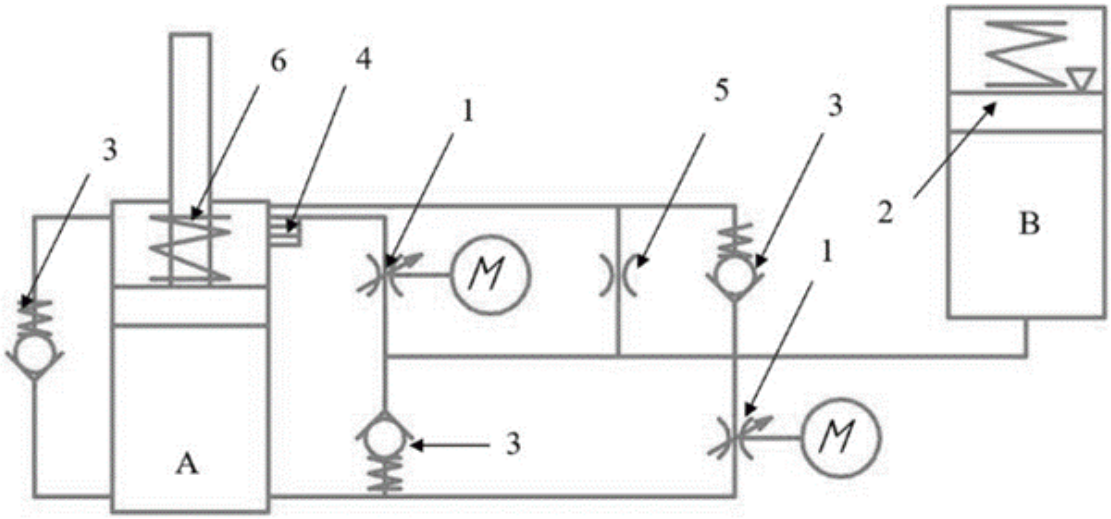


Рис. 2. Схема принципиальная пневмогидравлическая протеза компании C–Leg [1, 4]: *1* – дроссель, регулируемый электромотором; *2* – пневмогидроаккумулятор; *3* – обратные клапаны; *4* – распределённая группа каналов; *5* – дроссель; *6* – гидроцилиндр с пружинным возвратом; *A*, *B* – полости гидрооборудования

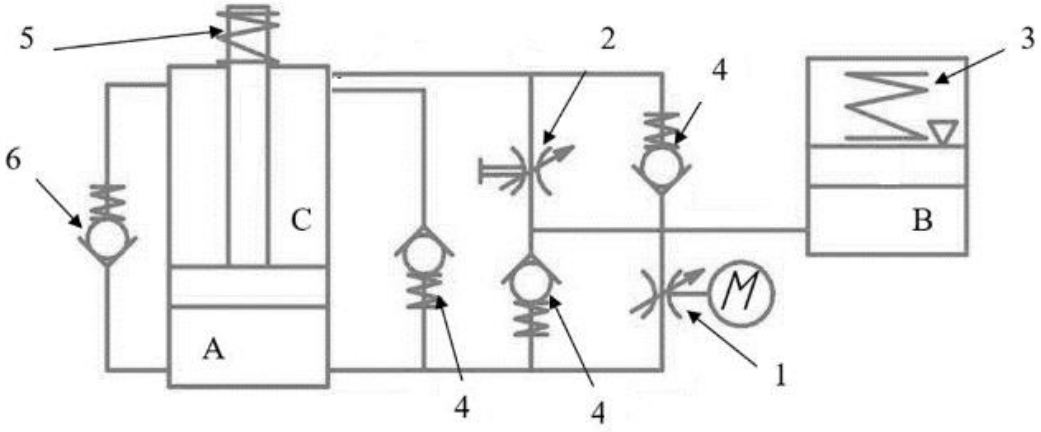


Рис. 3. Схема принципиальная пневмогидравлическая протеза компании Rel-K [2, 4]: *1* – дроссель, регулируемый электромотором; *2* – дроссель с ручной регулировкой; *3* – пневмогидроаккумулятор; *4* – обратный клапан; *5* – гидроцилиндр с пружинным возвратом; *A*, *B*, *C* – полости гидрооборудования

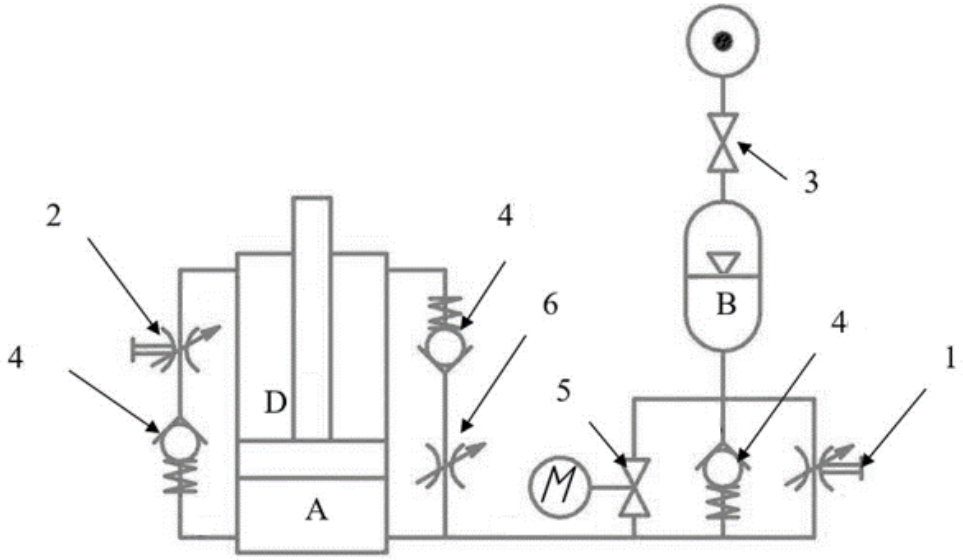


Рис. 4. Схема принципиальная пневмогидравлическая коленного протеза Plie2.0 с пневмогидроаккумулятором [3, 4]: *1*, *2* – дроссель с ручной регулировкой; *3* – клапан зарядки; *4* – обратные клапаны; *5* – дроссель, регулируемый электромотором; *6* – регулируемый дроссель; *A*, *B*, *D* – полости гидрооборудования

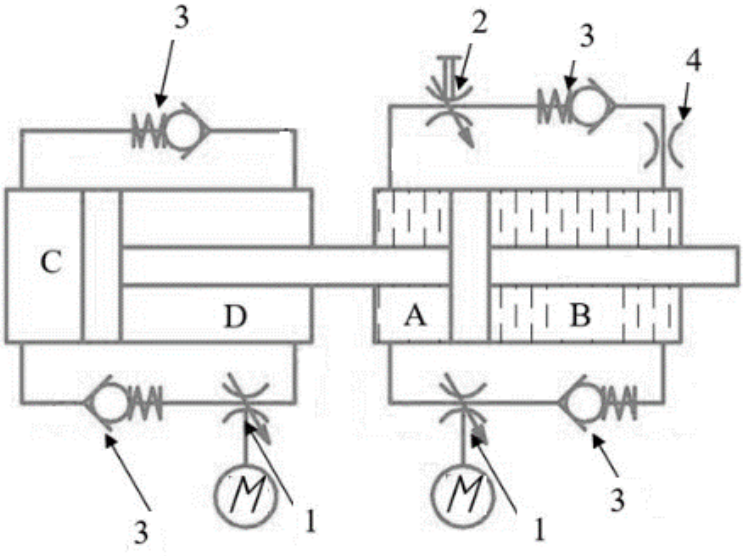


Рис. 5. Схема принципиальная пневмогидравлическая протеза компании Orion [3, 4]: *1* – дроссель, регулируемый электромотором; *2* – дроссель с ручной регулировкой; *3* – обратный клапан; *4* – дроссель; *A*, *B*, *C*, *D* – полости гидрооборудования

Протезы с микрогидравлическим приводом и активным демпфированием представляют собой наиболее перспективное направление в области протезирования. Они обладают рядом существенных преимуществ:

1. Высокая адаптивность к различным условиям: гидравлическая система, дополненная системой активного демпфирования, адаптируется к неровностям

поверхности, изменениям скорости движения и другим условиям, обеспечивая оптимальную поддержку, амортизацию и стабильность.

2. Естественность движений: активное демпфирование сглаживает рывки и удары, делая движения более плавными и естественными.

3. Повышенная энергоэффективность: активное демпфирование снижает нагрузку на пользователя, уменьшая энергозатраты на ходьбу.

В российских разработках, изобретениях отсутствуют аналогичные технические решения. Поэтому создание коленного модуля для протезов нижних конечностей с гидравлическим приводом и узлом демпфирования представляется актуальным на данный момент в нашей стране.

Библиографический список

1. Bellmann, M. Funktionsprinzipien aktueller Mikroprozessor gesteuerter Prothesenkniegelenke / M. Bellmann, T. Schmalz, S. Blumentritt // Orthopädie-Technik. – 2009. – 60, pp. 297–303.

2. Liang, W. Mechanisms and component design of prosthetic knees: A review from a biomechanical function perspective / W. Chen, Z. Qian, H. Song, Y. Cao, G. Wei, L. Ren, K. Wang, L. Ren // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2022.

3. Freedom Innovations. Intelligent Hydraulics: Plié2.0 MPC Knee. электронный ресурс URL: http://www.freedom-innovations.com/deutsch/knees/kneevideo.html (дата обращения 15.11.2024).

4. Илюхин, В.Н., Ермилов, М.А., Сафин, А.И., Видяскина, А.Н. Протезы нижних конечностей с активным демпфированием // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10. – № 2. – С. 84–97.

5. Протезирование гидравлического коленного сустава для инвалидов, электронный ресурс URL: https://ru.sjzpfc.com/product-hydraulic-knee-joint.html (дата обращения 15.11.2024).

6. Протезы ног, электронный ресурс URL: https://www.ottobock.com/ru-ru/prostheses/prosthetic-leg(дата обращения 15.11.2024).

© Грачев А.О., Мукминов Д.Ф., 2024

УДК 62-822

И.А. ДЕРГАЧЕВ
igor_dergachev@vk.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ
Уфимский университет науки и технологий

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РУЛЕВОГО ПРИВОДА ВНЕШНЕГО ЭЛЕРОНА ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЕТА

Аннотация: в статье представлена методика моделирования рулевого привода внешнего элерона гражданского самолета. Разработана математическая модель

электрогидравлического следящего привода с учетом конструктивных особенностей, и по результатам численной реализации математической модели построены динамические характеристики следящего привода.
Ключевые слова: элерон; гражданский самолёт; механизация крыла; рулевой привод; методика моделирования; математическая модель следящего привода.

За последние годы в процессе улучшения летных характеристик функциональные системы аэродинамических органов управления существенно изменились. Более сложные конструкции привели к резкому усложнению законов управления, что в свою очередь отразилось на времени разработки и стоимости проектирования. Для уменьшения расходов, связанных с проектированием или обновлением системы управления внешним элероном, требуется проведение исследований. Основной сложностью при разработке является недостаток актуальных способов автоматизации проектирования. Предполагаемые результаты данной работы позволят выработать методологию проектирования рулевых приводов [1].

Разработка современных рулевых механизмов сталкивается с проблемами при математическом моделировании, которое требует выполнения вычислений системы с использованием нелинейных дифференциальных уравнений. В определенных обстоятельствах дифференциальные уравнения с нелинейными условиями не дают возможности получить точные ответы. Близкие аналитические подходы обладают ограниченной сферой использования и содержат значительные упрощения [1].

Линейный метод анализа связан со сложностью решения нелинейных уравнений. Использование численного метода решения было ограничено уровнем вычислительных технологий [1].

В процессе цифровизации активно используется компьютерная симуляция. Этот способ идеально подходит для анализа многофакторных структур. Вычислительные симуляции дают возможность получения комплексных параметров анализируемого объекта [2].

Перед началом моделирования необходимо создать ее математическое описание. Уровень развития вычислительных технологий позволяет отказаться от множества допущений. Однако, данной возможностью принято пренебрегать. Это связано с невозможностью создания модели, описывающей все протекающие физические процессы. Также это увеличивает число входных параметров, значения которых не всегда могут быть известны [1].

В качестве расчетной схемы был принят электрогидравлический следящий привод с ЭГУ-2 (рис. 1).

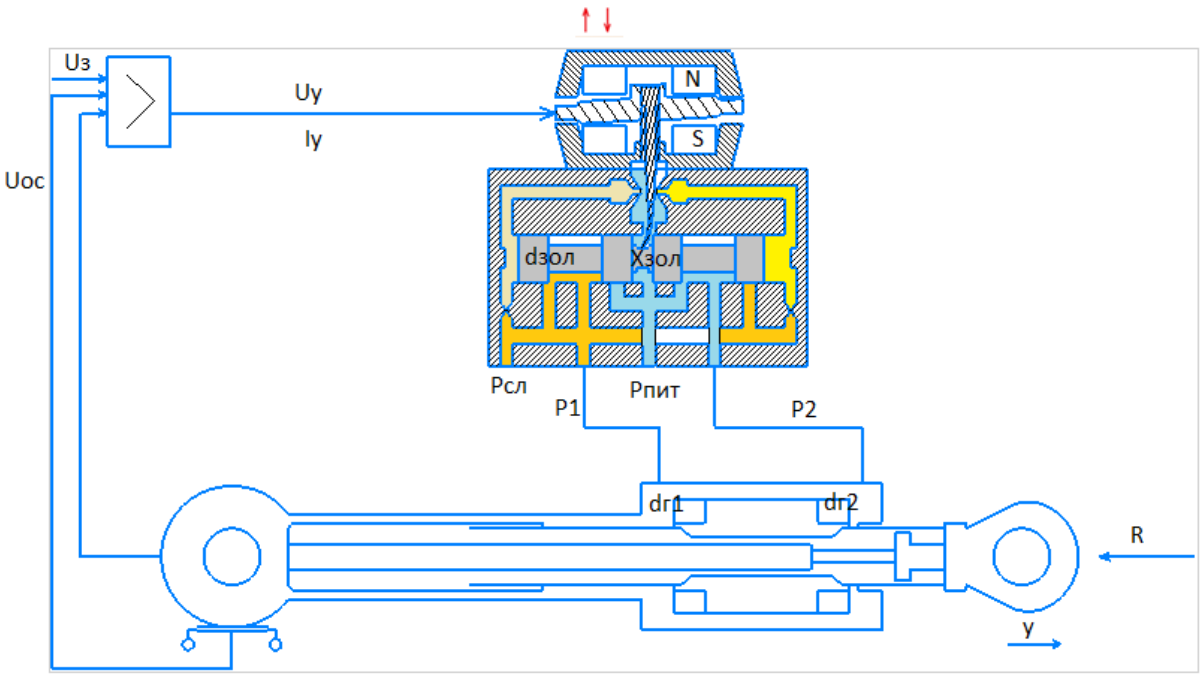


Рис. 1. Расчетная схема рулевого привода

При описании математической модели привода были приняты типовые допущения. С учетом параметров, полученных при построении статической модели системы, а также выбранных начальных условий составляется система дифференциальных уравнений, представленных в натуральной форме Коши. Таким образом, математическая модель примет следующий вид.

1. Уравнение электрической цепи:

$$U_n - K_{\text{oc}} \cdot y(t) = L_1 \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_y(t) + R_{em1} \cdot I_y(t) + K_{pe1} \cdot \frac{d}{dt} \cdot a_1(t) \qquad (1)$$

где U_n – напряжение электрической цепи обмотки управления ЭМП; K_{oc} – коэффициент позиционной обратной связи; L_1 – индуктивность обмотки ЭМП; R_{em1} – активное сопротивление ЭМП; K_{pe1} – коэффициент противо-ЭДС ЭМП.

2. Уравнение сопло-заслонки:

$$J \cdot \frac{d^2}{dt^2} \cdot a_1(t) = K_{mi2} \cdot I_y(t) - K_{ma} \cdot a_1(t) - K_{pe1} \cdot a_1(t) - R_g \cdot L_{zaclonki} - \\ - C_{\text{oc}} \cdot L_{zaclonki} \cdot \big(h(t) + x_1(t)\big) - b_e \cdot \frac{d}{dt} \cdot a_1(t), \qquad (2)$$

где J_1 – момент инерции якоря ЭМП; K_{mi2} – коэффициент моментной характеристики; K_{ma} – коэффициент механической характеристики; R_g – величина гидродинамических сил, действующих на заслонку; $L_{zaclonki}$ – длина заслонки и механической обратной связи; C_{oc} – жесткость пружины обратной связи золотника и ЭМП; b_e – коэффициент демпфирования якоря.

3. Уравнение балансов сопло-заслонки при двухкаскадной ЭГСП:

$$K_{Qh} \cdot h(t) - K_{qp} \cdot P_z(t) = A_{zol} \cdot \frac{d}{dt} x_1(t) + \frac{V_k \cdot \frac{d}{dt} \cdot P_z(t)}{2 \cdot E_1} \quad (3)$$

где K_{Qh} – коэффициент усиления по расходу; K_{qp} – коэффициент усиления по давлению; A_{zol} – площадь золотника; E_1 – модуль объемной упругости.

4. Уравнения динамики золотникового гидрораспределителя:

$$P_z(t) = \frac{C_{zol} \cdot x_1(t) + C_{oc} \cdot h(t)}{A_{zol}}, \quad (4)$$

$$\mu \cdot b_{okna} \cdot x_1(t) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{P_p - P_d(t) - P_{cl}}{2\rho}} = A \cdot \frac{d}{dt} \cdot y(t) + W \cdot \frac{\frac{d}{dt} \cdot P_d(t)}{2 \cdot E_1}, \quad (5)$$

где C_{zol} – жесткость золотника; $A_{эф}$ – эффективная площадь поршня; b_{okna} – ширина окна в золотниковой гильзе.

5. Уравнения движения приведенных масс нагрузки и поршня ГЦ:

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} y(t) = A \cdot P_d(t) - b \cdot \frac{d}{dt} y(t) - C_{sv} \cdot \big(y(t) - y_n(t)\big), \quad (6)$$

$$m_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} y_n(t) = C_{sv} \cdot \big(y(t) - y_n(t)\big) - b_2 \cdot \frac{d}{dt} y_n(t) - F_{tr} - R, \quad (7)$$

где M_1 – масса поршня, ГЦ; b – коэффициент вязкого трения в ГЦ; C_{sv} – коэффициент жесткости кинематической связи штока гидроцилиндра с нагрузкой; m_2 – масса нагрузки [3].

Для реализации математической модели в среде «MathCad» был использован метод Рунге-Кутта 4 порядка. В результате были построены следующие характеристики (рис. 2).

Предложена методика предварительного моделирования рулевого привода внешнего элерона гражданского самолёта, которая включает разработку расчётной схемы и формулировку уравнений, описывающих переходные процессы в гидроприводе с учётом заданных параметров и допущений. Полученные характеристики необходимо сопоставить с экспериментальными данными для верификации корректности как методики, так и модели.

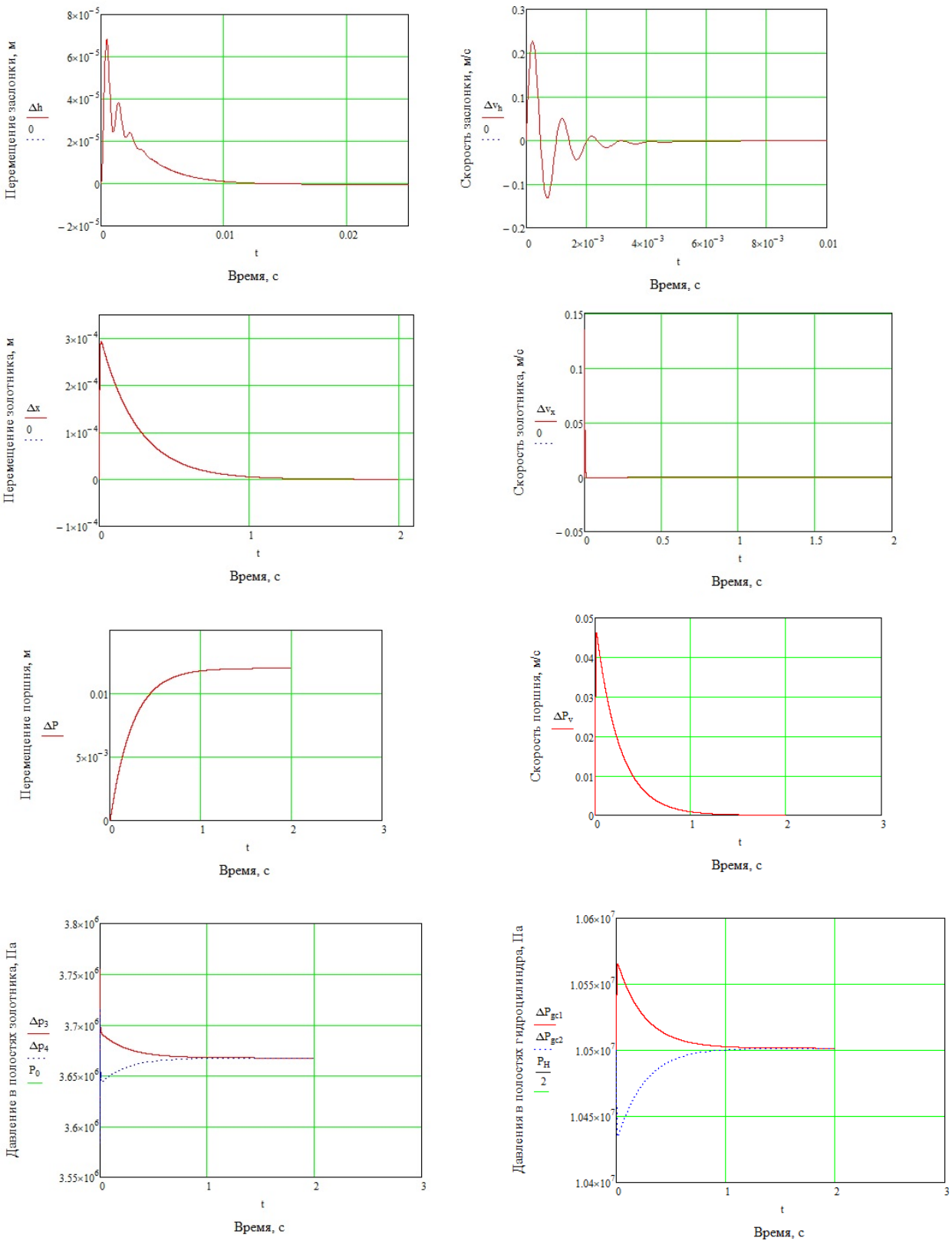


Рис. 2. Результаты моделирования

Библиографический список

1. Петров, П.В. Основные подходы и особенности проектирования гидромеханических систем управления самолёта. / П.В. Петров, В.А. Целищев, Д.А. Кудерко // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 67–79. – DOI 10.18287/2541-7533-2024-23-1-67-79. – EDN WOKYFF.
2. Петров, П.В. Совершенствование численных методов расчета гидромеханических устройств автоматики летательных аппаратов. / П.В. Петров, В.А. Целищев, Д.А. Кудерко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2021. – № 66. – С. 79–87. – DOI 10.15593/2224- 9982/2021.66.08. – EDN UBEUYV.
3. Потеряхина, П.В. Моделирование гидравлического привода руля высоты гражданского самолета. / П.В. Потеряхина, В.А. Целищев, Д.А. Кудерко // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: XXVI Международная научно-техническая конференция, Москва, 07 декабря 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Мир науки», 2022. – С. 139–143. – EDN JJUSTU.

© Дергачев И.А., 2024

УДК 339

Д.А. ДМИТРИЕНКО
happydine@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

РОССИЙСКО-КИТАЙСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В СФЕРЕ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК

Аннотация: в статье проведен комплексный анализ современного состояния и перспектив российского и китайского сотрудничества в области грузовых перевозок, освещены основные виды транспорта, используемые в двусторонней торговле, и выявлены основные инфраструктурные и регуляторные барьеры, ограничивающие рост товарооборота.
Ключевые слова: грузовые перевозки; Россия; Китай; экспорт транспортных услуг; логистическая инфраструктура; интеграция.

Укрепление торгово-экономического сотрудничества между Россией и Китаем стало ключевым фактором роста экономик обеих стран за последние годы. В 2023 году товарооборот между Россией и Китаем достиг рекордной отметки в 198,3 млрд долларов, увеличившись на 6,8% по сравнению с 2022 годом [1]. При этом лидеры двух стран поставили амбициозную цель: увеличить объём двусторонней торговли до 250 млрд долларов к 2025 году. Достижение этой цели требует не только расширения товарного ассортимента, но и значительного улучшения транспортной и логистической инфраструктуры, связывающей обе страны.

Несмотря на влияние пандемии COVID-19 и геополитических вызовов, объёмы грузовых перевозок между Россией и Китаем продолжают расти. В частности, перевалка китайских грузов через российские морские порты увеличилась на 5,1%, составив 81,2 млн тонн [2]. Ввод в эксплуатацию автомобильного моста через Амур между Благовещенском и Хэйхэ также оказал значительное влияние, увеличив грузопоток на 57%, до 1,1 млн тонн [3]. Воздушные перевозки показали рост в 1,8 раза, превысив 180 тыс. тонн [4].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексного анализа инфраструктурных и нормативных барьеров, препятствующих дальнейшему увеличению объёмов перевозок. Выявление и устранение этих барьеров станет важным шагом для достижения намеченных экономических целей и обеспечения устойчивого роста товарооборота между Россией и Китаем.

Важной характеристикой товарных потоков между РФ и КНР является их несбалансированная структура (табл. 1*Таблица*). В российском экспорте традиционно доминируют сырьевые товары: минеральное топливо (67,3%); древесина и целлюлоза (8,1%); продовольствие и с/х сырье (6,4%); металлы и изделия из них (6,0%). Суммарно на эти четыре товарные группы приходится почти 88% стоимостного объема поставок в Китай. С другой стороны, в импорте из КНР преобладают готовые изделия с высокой добавленной стоимостью: машины и оборудование (60,8%); продукция химической промышленности (9,5%); одежда и обувь (6,1%).

Таблица 1

Товарная структура российско-китайской торговли, 2023 год

№ п/п	Товарная группа	Доля в экспорте РФ в КНР, %	Доля в импорте РФ в КНР, %
1.	Минеральное топливо	67,3	0,1
2.	Древесина и целлюлоза	8,1	0,8
3.	Продовольствие и с/х сырье	6,4	3,3
4.	Металлы и изделия из них	6,0	6,7
5.	Машины и оборудование	3,5	60,8
6.	Химические товары	2,9	9,5
7.	Прочие товары	5,8	18,8

Безусловно, подобная асимметрия создает определенные риски для нашей страны, обусловленные зависимостью от нестабильной ценовой конъюнктуры на глобальных сырьевых рынках. В случае резкого падения цен на энергоносители и другие биржевые товары возможно существенное сокращение экспортной выручки и ухудшение условий торговли. Вместе с тем, преобладание в российском экспорте массовых грузов, прежде всего угля, нефти, древесины, руды, удобрений, зерна, создает устойчивую грузовую базу для железнодорожного и морского транспорта. В свою очередь импорт из Китая потребительских и промышленных товаров в основном осуществляется в контейнерах мультимодальными перевозками с использованием морского, железнодорожного и автомобильного транспорта.

Таким образом, несмотря на дисбалансы в товарной структуре, торговля между Россией и Китаем генерирует значительные объемы грузовой работы для всех видов транспорта. По оценкам экспертов потенциал роста двустороннего товарооборота к 2025 году составляет не менее 50 млрд долл. [6]. Во многом его реализация будет зависеть от развития транспортной инфраструктуры и качества логистических услуг.

Сравнительный анализ видов транспорта в грузоперевозках между Россией и Китаем. В обслуживании российско-китайской торговли ключевую роль играют четыре вида транспорта: железнодорожный; морской; автомобильный; воздушный. Каждый из них имеет свою специфику с точки зрения номенклатуры перевозимых грузов, стоимости и скорости доставки, надежности и безопасности (табл. 2).

Основной объем перевозок приходится на железнодорожный транспорт, доля которого в двустороннем грузообороте достигает 62%. Этот вид транспорта лучше всего подходит для доставки насыпных, наливных и тяжеловесных грузов на большие расстояния. Он отличается высокой провозной способностью, относительно низкой себестоимостью, независимостью от погодных условий. Через погранпереходы Забайкальск-Маньчжурия, Гродеково-Суйфэньхэ и Махалино-Хуньчунь перевозятся уголь, руда, лес, удобрения, зерно, контейнеры и другие грузы. Важным конкурентным преимуществом железной дороги является возможность доставки грузов из Китая в Европу транзитом по территории России за 14–18 суток, что в 2-3 раза быстрее по сравнению с морскими маршрутами через Суэцкий канал.

Таблица 2

Сравнительные характеристики видов транспорта в грузоперевозках между Россией и Китаем

№ п/п	Параметры	Ж/д	Море	Авто	Авиа
1.	Доля в структуре грузооборота РФ-КНР, %	62	28	8	2

Продолжение таблицы 2

2.	Стоимость доставки 40-футового контейнера из Шанхая в Москву, $	6500	3000	10000	35000
3.	Срок доставки, сут.	14-18	30-45	10-14	5-7
4.	Сохранность груза	высокая	средняя	высокая	очень высокая

На втором месте находится морской транспорт, на долю которого приходится около 28% грузооборота между РФ и КНР. Он незаменим для перевозки больших партий наливных и навалочных грузов, прежде всего сырой нефти, нефтепродуктов, угля, руды, минеральных удобрений, зерна. Низкая стоимость фрахта и высокая грузоподъемность судов делают морские перевозки экономически эффективными для доставки массовых грузов. Вместе с тем, этому виду транспорта присущи и определенные недостатки: более длительные сроки доставки (30–45 суток); зависимость от погодных условий; необходимость частой смены видов транспорта. Основной грузопоток между российскими и китайскими портами проходит через Приморский край (порты Восточный, Владивосток, Находка) и северо-восточные провинции КНР (Далянь, Циндао, Тяньцзинь).

Доля автомобильного транспорта в грузоперевозках между Россией и Китаем составляет около 8%, однако в последние годы он демонстрирует наиболее высокие темпы роста. Главными преимуществами автомобильных перевозок являются гибкость, мобильность и скорость доставки от двери до двери. Они незаменимы для транспортировки ценных, скоропортящихся и негабаритных грузов на небольшие и средние расстояния. Недостатками являются: ограниченная грузоподъемность; зависимость от состояния дорожной сети; зависимость от погодных и климатических условий. Основные автомобильные маршруты между РФ и КНР проходят через МАПП Забайкальск-Маньчжурия, Пограничный-Суйфэньхэ, Краскино-Хунчунь. Ввод в эксплуатацию моста Благовещенск-Хэйхэ создал новый транспортный коридор между российским Дальним Востоком и северо-восточными провинциями Китая.

Доля воздушного транспорта в российско-китайских грузоперевозках не превышает 2%, но именно он обеспечивает доставку наиболее срочных и ценных грузов за минимальное время, от 3 до 7 суток. Речь идет прежде всего о скоропортящейся продукции, живых животных, лекарствах, образцах и пробах товаров, дорогостоящей электронике, документах и почте. Главным минусом авиаперевозок является их высокая стоимость, которая в 5–10 раз превышает тарифы других видов транспорта. Базовыми аэропортами для перевозки грузов между РФ и КНР являются Шереметьево, Домодедово, Пулково, Кневичи с российской стороны и Пекин, Шанхай, Гуанчжоу, Гонконг, Чэнду с китайской.

Таким образом, каждый вид транспорта играет свою роль в обслуживании российско-китайской торговли, имея свои сильные и слабые стороны.

Оптимальный выбор зависит от характера груза, объема партии, расстояния, фактора времени, бюджета грузовладельца. Наиболее эффективной является мультимодальная схема перевозки, сочетающая различные виды транспорта для достижения лучшего результата по соотношению цены, скорости и качества доставки.

Вместе с тем дальнейшее наращивание объемов грузовых перевозок сдерживается рядом инфраструктурных ограничений и регуляторных барьеров. В первую очередь речь идет о недостаточной пропускной способности пограничных пунктов пропуска, низких темпах обновления парка грузовых вагонов и контейнеров, дефиците современных логистических центров, несогласованности тарифной политики, отсутствии унифицированных стандартов обслуживания и документооборота. Для устранения этих «узких мест» реализуются крупные инвестиционные проекты как на двусторонней, так и на многосторонней основе, такие как модернизация БАМа и Транссиба, создание международных транспортных коридоров «Приморье-1» и «Приморье-2», сопряжение ЕАЭС с инициативой «Один пояс – один путь».

Основными проблемами в развитии транспортно-логистической инфраструктуры между Россией и Китаем являются: дефицит пропускной способности погранпереходов и «узкие места» на подходах к ним; высокая степень износа подвижного состава и терминально-складских мощностей; отставание в цифровизации логистических процессов и внедрении интеллектуальных транспортных систем.

Для их решения реализуются такие инфраструктурные проекты, как модернизация БАМа и Транссиба, строительство дополнительных погранпереходов, создание МТК «Приморье-1» и «Приморье-2», формирование опорной сети транспортно-логистических центров. Важным направлением является цифровая трансформация перевозочного процесса за счет внедрения электронного документооборота, единой системы транспортно-логистических услуг, платформенных решений.

По оценкам экспертов реализация этих мер позволит увеличить объем перевозок между РФ и КНР до 180 млн тонн к 2030 году, сократить время доставки грузов в 1,5 раза, повысить уровень контейнеризации до 35% [8].

Ключевыми факторами успеха на китайском рынке будут: внедрение цифровых платформ мультимодальных перевозок; кастомизация логистических решений; обеспечение бесшовной состыковки транспортных систем; соблюдение международных стандартов качества [9].

Проведенное исследование позволило выявить основные инфраструктурные и регуляторные ограничения, препятствующие развитию грузоперевозок между Россией и Китаем. Сравнительный анализ показал, что каждый вид транспорта обладает специфическими преимуществами и недостатками, которые делают его более подходящим для определенных типов грузов и условий доставки. На основе полученных данных сформулированы рекомендации по модернизации транспортной

инфраструктуры, внедрению цифровых решений в логистических процессах и унификации нормативно-правовой базы в сфере грузоперевозок. Выполнение этих рекомендаций позволит значительно повысить эффективность грузовых перевозок и будет способствовать дальнейшему развитию экономического сотрудничества между Россией и Китаем.

Библиографический список

1. Обзор внешней торговли России в 2023 г. ФТС России. [Электронный ресурс]. URL: https://customs.gov.ru (дата обращения: 05.07.2023).
2. Обзор грузооборота морских портов России за 2023 год. Ассоциация морских торговых портов. [Электронный ресурс]. URL: http://www.morport.com (дата обращения: 01.07.2023).
3. Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: https://company.rzd.ru (дата обращения: 03.07.2023).
4. Итоги работы транспорта в 2023 г. Минтранс России. [Электронный ресурс]. URL: https://mintrans.gov.ru/ (дата обращения: 05.07.2023).
5. Прогноз развития российско-китайской торговли до 2025 года. Исследовательский центр ВЭБ РФ. [Электронный ресурс]. URL: http://veb.ru (дата обращения: 06.07.2023).
6. Сравнительный анализ видов транспорта в грузоперевозках между Россией и Китаем. Русско-Азиатский Союз промышленников и предпринимателей. [Электронный ресурс]. URL: https://raspp.ru (дата обращения: 02.07.2023).
7. Михеева, Н.Н., Швецов, А.Н. Потенциал развития международных транспортных коридоров на Дальнем Востоке России // ЭКО. 2022. № 12 (582). С. 8–25. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2022-12-8-25.
8. Шаш, Н. Н., Азимов, П. Х. Цифровизация логистики экспортно-импортных грузопотоков России и Китая: перспективы и ограничения // Вестник Московского университета им. С. Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. 2022. № 2 (41). С. 50–58. DOI: 10.21777/2587-554X-2022-2-50-58.
9. Российско-китайский диалог: модель 2023: доклад № 84/2023 / [С.Г. Лузянин (рук.) и др.; Х. Чжао (рук.) и др.]; Российский совет по международным делам (РСМД).– М.: НП РСМД, 2023. – 198 с. ISBN 978-5-6046830-8-5.

© Дмитриенко Д.А., 2024

УДК 621.864:62-82
И.В. ДОЛГОПОЛОВ
ilyaidol6@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский Университет науки и технологий

ГИДРОПРИВОД ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ

Аннотация: в статье рассматривается гидравлическая схема дорожной фрезы.
Ключевые слова: гидравлическая схема; дорожная машина; дорожная фреза; гидропривод дорожной фрезы.

Управление процессом фрезерования на современных дорогах осуществляется с помощью инновационной системы – гидропривода, который играет решающую роль в технологиях строительства и ремонта. Этот механизм, основанный на сложной гидравлике, обеспечивает существенное повышение производительности дорожно-фрезеровальных машин путем оптимизации обработки покрытий. Особенности такой системы заключаются в плавном контроле над мощностью и скоростью работы, что гарантирует высокую точность операций. Кроме того, гидроприводы отличаются выдающейся надежностью и долговечностью, делая их незаменимыми компонентами современного дорожного хозяйства.

Машина дорожная фреза, специализирующаяся на рыхлении различных покрытий (включая асфальтобетон), становится краеугольным камнем при ремонте дорог и их реконструкции. Её основное предназначение состоит в тщательной подготовке основания для последующих работ по укладке новых слоев. Важнейшим фактором, определяющим качество выполнения этих задач, является гидропривод машины, его конструкция и параметры обеспечивают требуемую мощность и точное управление фрезерными операциями, что критически важно для достижения долговечности дорожных сооружений.

Конструкция дорожной фрезы (рис. 1):

– *1* – корпус, защищает внутренние механизмы и системы от внешних воздействий, таких как пыль, грязь, влага и механические повреждения, что продлевает срок службы машины;

– *2* – рама, обеспечивает устойчивость фрезы во время работы, позволяя равномерно распределить вес машины и минимизировать вибрации, это важно для точности фрезерования и долговечности оборудования;

– *3* – фрезерный барабан, основной рабочий элемент, оснащенный зубьями, который вращается с высокой скоростью для удаления верхних слоев покрытия;

– *4* – гидроцилиндр, используется для управления движением фрезерного барабана, позволяя регулировать его глубину фрезерования;

– *5* – резцы, предназначены для механического удаления асфальтового или бетонного покрытия, они разрушают материал, позволяя фрезе снимать его с поверхности дороги;

– *6* – рукав высокого давления (РВД) привода с быстроразъемным соединением (БРС), используется для передачи гидравлической жидкости от насосов к различным компонентам фрезы, таким как гидроцилиндры, а также осуществляет управление различными функциями фрезы, такими как подъем и опускание фрезерного барабана и регулировка глубины фрезерования;

– *7* – гидромотор, основная функция гидромотора заключается в передаче механической энергии для вращения фрезерного барабана, это позволяет резцам эффективно снимать верхний слой покрытия дороги, обеспечивает плавное и равномерное вращение, что снижает вибрации и улучшает качество фрезерования;

– *8* – РВД гидроцилиндра, служит для передачи гидравлической жидкости от гидравлической системы (например, насоса) к гидроцилиндрам, которые управляют различными механизмами фрезы.

В качестве примера гидравлической схемы для дорожной фрезы выбрана соответствующая конструкция (рис. 2). Обычно гидросистема расположена в задней части устройства и предназначена для привода рабочей части фрезы, что включает управление вращением фрезерного барабана. Гидравлические приводы отличаются высокой производительностью и точностью работы, а также позволяют настраивать скорость вращения барабана и иные параметры в зависимости от условий обработки материала.

В некоторых версиях машины может быть установлено несколько гидромоторов, что способствует повышению общей эффективности и маневренности устройства.

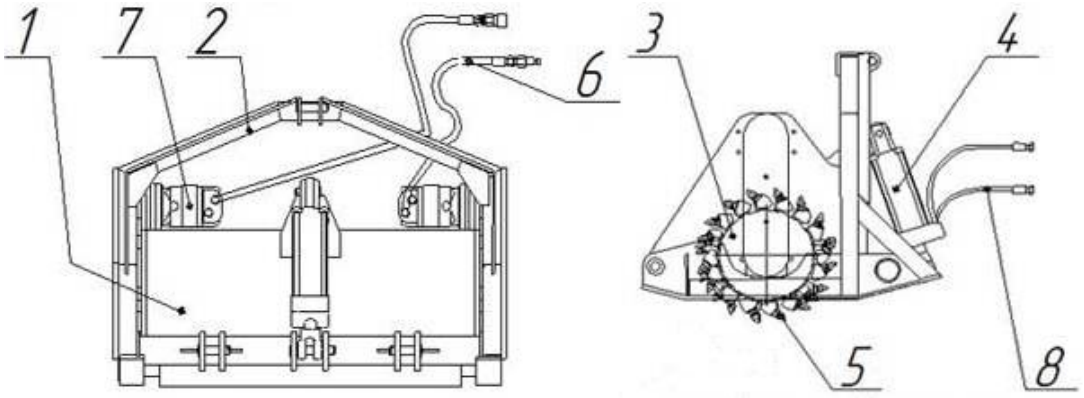


Рис. 1. Конструкция дорожной фрезы [2]: *1* – корпус; *2* – рама; *3* – фрезерный барабан; *4* – гидроцилиндр; *5* – резцы; *6* – РВД с БРС; *7* – гидромотор; *8* – РВД гидроцилиндра

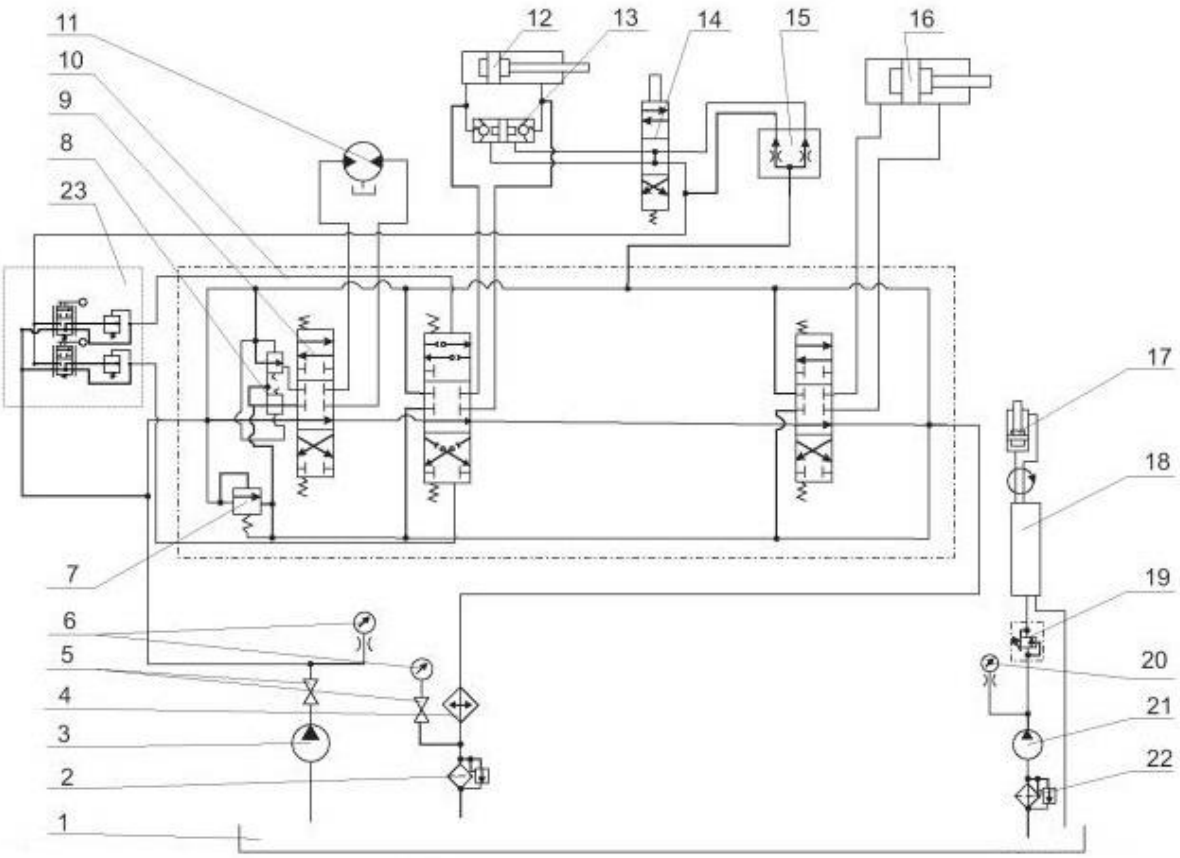


Рис. 2. Гидравлическая схема дорожной фрезы [1]:
1 – гидробак; *2* – фильтр; *3* – насос привода фрезы; *4* – охладитель; *5* – краны манометров; *6* – манометры; *7* – клапан предохранительный; *8* – клапан противообгонный; *9* – золотник гидрораспределителя; *10* – гидрораспределитель; *11* – гидромотор привода фрезы; *12* – гидроцилиндр подъема фрезы; *13* – гидрозамок; *14* – золотник следящий; *15* – делитель потока; *16* – гидроцилиндр подъема бульдозерного отвала; *17* – гидроцилиндр поворота колес; *18* – рулевое управление; *19* – клапан предохранительный; *20* – манометр; *21* – насос рулевого управления; *22* – фильтр; *23* – блок управления

Для быстрого подъема или опускания ротора дорожной фрезы пользуются золотником *12*, при этом золотник *19* находится в положении «Нейтрально», и следящий золотник *8* не оказывает влияния на работу силового цилиндра *15*.

Работа устройства осуществляется следующим образом [1].

Когда ротор *1* дорожной фрезы находится в нерабочем положении, т.е. приподнят над грунтом, устанавливают концевую часть *11* составного рычага по заранее тарированной шкале вертикальной стойки основной части *10* составного рычага в положение, соответствующее заданной глубине обработки грунта, и закрепляют ее, например, стопорными болтами. Концевая часть *11* составного рычага не контактирует с опорой *3* ротора *1*. Золотник *12* ставят в положение «Нейтрально», а золотник *19* в положение, обеспечивающее движение рабочей жидкости по трубопроводу *21* в делитель потока *20*, а затем необходимое ее количество по трубопроводу *22* в следящий золотник *8*. Остальная жидкость по трубопроводу *23* через золотник *19* идет на слив в бак *26*. На подпружиненный шток *9* действует только вес частей *10* и *11* составного рычага, и он пропустит жидкость через трубопровод *17* в правую часть замка *16* и штоковую полость силового цилиндра *15*. Ротор начинает опускаться, врезается в грунт, а «плавающий» корпус лыжами *7* станет на спланированную поверхность грунта. Ротор опускается до тех пор, пока опора *3* не войдет в контакт с концевой частью *11* составного рычага, а основная часть *10* составного рычага не надавит на подпружиненный шток *9* следящего золотника *8*. Следящий золотник *8* займет положение «Нейтрально», прекратится поступление жидкости в силовой цилиндр *15* и опускание ротора *1* [1].

При работе дорожной фрезы, когда, например, задняя часть движителя тягача *5* окажется на возвышении, опора *3* ротора *1* отойдет вверх от концевой части *11* составного рычага, возвращение ротора *1* в заданное положение произойдет, как описано выше [1].

Если задняя часть движителя тягача окажется во впадине, то опора *3* ротора *1* через концевую часть *11* составного рычага основной частью *10* составного рычага опустит подпружиненный шток *9* в положение, обеспечивающее движение рабочей жидкости по трубопроводу *18* через левую часть замка *16* в поршневую полость силового цилиндра *15*, а из штоковой через правую часть замка *16*, трубопровод *17*, следящий золотник *8*, трубопровод *24* и золотник *19* на слив в бак [1].

Начинается подъем ротора *1*, который продолжается до тех пор, пока подпружиненный шток *9* не станет в положение «Нейтрально», тем самым перекроет обе полости силового цилиндра *15*. Подъем ротора *1* дорожной фрезы прекратится, а глубина обрабатываемого слоя грунта будет соответствовать заданной [1].

Гидравлический механизм дорожной фрезы имеет множество достоинств, благодаря которым он стал ключевым элементом в строительстве дорог. Тем не

менее, гидропривод может столкнуться с определенными трудностями, влияющими на его функциональность. Вот несколько из таких проблем:

1. Утечки жидкости. Утечки могут возникать из-за износа уплотнений, повреждения шлангов или соединений. Это приводит к снижению давления в системе и, как следствие, к потере мощности и эффективности работы.

2. Загрязнение гидравлической жидкости. Загрязненная жидкость может повредить компоненты гидросистемы, такие как насосы и цилиндры. Загрязнения могут возникать из-за износа деталей, попадания посторонних частиц или использования некачественной жидкости.

3. Перегрев. Работа при высоких нагрузках или недостаточная циркуляция жидкости могут привести к перегреву, что ухудшает свойства жидкости и может вызвать повреждение компонентов системы.

4. Неправильная настройка системы. Неправильная регулировка клапанов и насосов может привести к неэффективной работе гидропривода, что негативно скажется на производительности фрезы.

5. Воздушные пробки. Попадание воздуха в гидравлическую систему может привести к снижению производительности и нестабильной работе механизмов.

Гидравлическая система дорожной фрезы представляет собой передовое и многоступенчатое устройство, выполняющее важнейшую функцию в поддержании эффективности и точности действия агрегата. Этот комплекс обеспечивает передачу энергии и регулирование оперативных процедур, что напрямую сказывается на продуктивности реализации работ по обработке металла.

Тем не менее, как и любое другое техническое устройство, гидроприводы подвержены различным неисправностям и проблемам, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации.

Для обеспечения надежной работы дорожной фрезы на протяжении всего ее эксплуатационного срока необходимо внедрять ряд профилактических мероприятий. К ним относятся: регулярные проверки состояния гидропривода, что позволяет выявлять потенциальные неисправности на ранних стадиях; использование высококачественных гидравлических жидкостей, соответствующих спецификациям производителя; строгое соблюдение всех рекомендаций и инструкций, предоставленных производителем оборудования.

Таким образом, систематический подход к техническому обслуживанию и эксплуатации гидропривода является необходимым условием для достижения оптимальных результатов в процессе выполнения дорожных работ.

Библиографический список

1. Studfile.net [Электронный ресурс] // URL: https://studfile.net/preview/16903757/page:3/ (Дата обращения: 14.11.2024).

2. ПРОФТЕХНИКА [Электронный ресурс] // URL: https://www.proftehnika.ru/catalog/dorozhnaya-freza-dlya-asfalta-s-gidroprivodom/ (Дата обращения: 14.11.2024).
3. Епифанов, В.Н., Васильевых, С.Л. «Гидравлический привод строительных и дорожных машин: учебное пособие».

© Долгополов И.В., 2024

УДК 629.7.062.5

А.А. ИВАНОВ
alexey@ainirrv.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ

Уфимский Университет науки и технологий

АВТОНОМНЫЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РУЛЕВОЙ ПРИВОД ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Аннотация: в статье рассматривается автономный электрогидравлический рулевой привод летательного аппарата.
Ключевые слова: гидравлическая система; электрогидравлический рулевой привод; летательный аппарат.

Система управления любыми рулевыми поверхностями летательного аппарата играет решающую роль в обеспечении точности, плавности, устойчивости и безопасности на протяжении всего полёта. В состав таких систем входят различного типа электронно-вычислительные, электрические, гидравлические и механические устройства, работа в сумме которых должна обеспечивать необходимые параметры в работе рулевых приводов.

Рулевой привод – это механизм, который обеспечивает движение рулевой поверхности летательного аппарата.

Примером рулевого привода выбран руль высоты (рис. 1), который располагается на стабилизаторе хвостовой части самолёта и оснащен дополнительно триммерами – щитками аэродинамической компенсации. Руль высоты используется для маневрирования в вертикальной плоскости, а стабилизатор для балансировки самолёта в установившемся полёте. Обе поверхности руля высоты отклоняются симметрично.

Посредством отклонения руля высоты возникает аэродинамическая сила, которая порождает момент силы относительно центра тяжести самолета, а в следствии и изменение угла тангажа [2].

Вид руля высоты «нормальная схема». Расположен на задней кромке стабилизатора. Эта схема обеспечивает хорошую продольную управляемость

и устойчивость в различных режимах полета. Однако, стабилизаторы создают отрицательную подъемную силу, что приводит к «потере на балансировку», то есть необходимо приложить дополнительное усилие для поддержания равновесия [3].



Рис. 1. Расположение руля высоты гражданского самолёта [1]

В ходе работы электрогидравлического рулевого привода могут возникать следующие проблемы:

1. Сложность конструкции. Гидравлическая система, изображённая на схеме (рис. 2), включает три независимых подсистемы (ГС1, ГС2 и ГС3), каждая из которых содержит насосные станции, двухкаскадные гидрораспределители и двухштоковые гидроцилиндры. Наличие большого числа компонентов увеличивает вероятность неисправностей, затрудняет диагностику и усложняет ремонт. Например, использование нескольких насосных станций требует синхронизации их работы для поддержания стабильного давления в системе.

2. Большая масса. Насосные станции, работающие от газотурбинных двигателей и электродвигателей, гидрораспределители и гидроцилиндры имеют значительный вес. Это увеличивает нагрузку на конструкцию летательного аппарата. Например, двухштоковые гидроцилиндры обладают преимуществами в симметричности усилий, но при этом их масса выше по сравнению с односторонними цилиндрами аналогичной мощности.

3. Перегрев гидравлической системы. Гидравлические системы могут перегреваться при длительной работе в режиме высокой нагрузки.

4. Загрязнение рабочей жидкости. Попадание посторонних частиц в гидравлическую систему может привести к поломкам и неисправностям.

5. Точность позиционирования. Гидравлические системы не всегда обеспечивают высокую точность позиционирования рулевых поверхностей.

6. Низкие показатели энергетической и топливной эффективности. Дроссельное регулирование, применяемое в насосных станциях, приводит

к значительным потерям энергии. Это снижает общий коэффициент полезного действия (КПД) системы и увеличивает расход топлива самолёта.

7. Неустойчивость в работе на малых дозвуковых скоростях полета. При низких скоростях полета гидравлические системы могут проявлять нестабильность в работе, что требует применения дополнительных регулирующих элементов.

8. Заклинивание электрогидравлического сервопривода. Износ или поломка сервопривода могут привести к заклиниванию рулевых поверхностей и невозможности управления летательным аппаратом.

Некоторые из данных проблем являются типовыми для рулевых поверхностей самолёта. Данные проблемы решаются за счёт дополнения гидроприводов необходимыми электро-гидроагрегатами, либо внесением изменений в их принципиальную гидравлическую схему. Одним из направлений решения существующих проблем является использование автономных электрогидравлических рулевых приводов с комбинированным принципом регулирования, что способствует улучшению энергоэффективности систем управления, унификации оборудования и снижению эксплуатационных затрат [4].

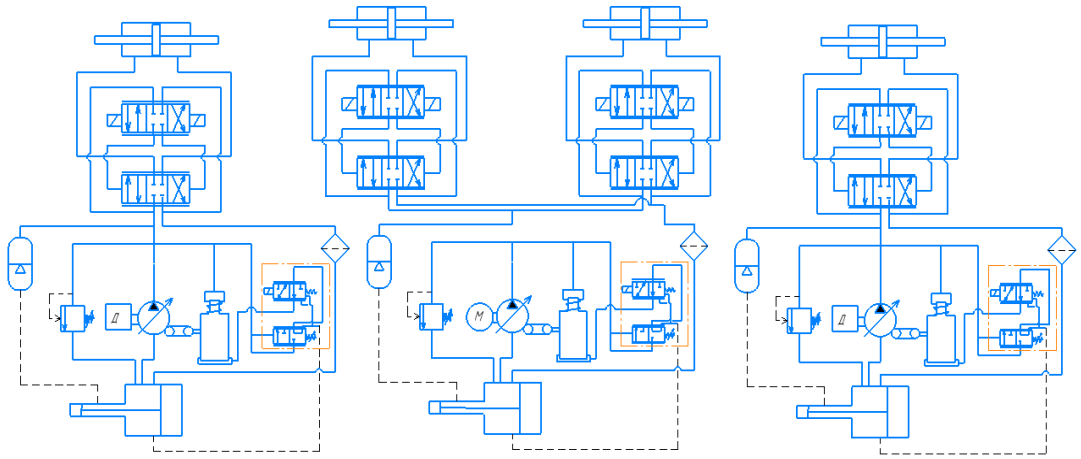


Рис. 2. Гидравлическая система привода руля высоты гражданского самолёта [5]

Гидравлическая схема построена на основе описания реальной работы электрогидравлического рулевого привода.

Общая гидросистема состоит из трех независимых гидросистем: ГС1 и ГС3 включают насосные станции, запитанные от газотурбинных двигателей и электродвигателя, двухкаскадные пропорциональные трёхпозиционные четырехлинейные гидрораспределители с электрогидравлическим способом регулирования и двухштоковые гидроцилиндры; ГС2 включает насосные

станции, работающие от электродвигателя, распределители, аналогичные системам ГС1 и ГС2, и два двухштоковых гидроцилиндра.

Насосная станция летательного аппарата обеспечивает поддержание в системе постоянного давления с помощью регуляторов давления и регулирование расхода жидкости дроссельным способом.

Одной из значительных проблем электрогидравлических систем является низкая энергетическая и топливная эффективность. Это связано с особенностями работы гидравлических компонентов, включая насосные станции, распределители и гидроцилиндры, которые характеризуются значительными потерями энергии на каждом этапе её преобразования и передачи. Гидравлические потери на линии нагнетания (рис. 3) достигают значительных величин при высоких расходах, что подтверждает необходимость оптимизации системы.

Для повышения энергоэффективности систем управления рулевыми поверхностями необходим детальный анализ текущих характеристик, оценка основных источников потерь и внедрение решений, направленных на их минимизацию. В следующем разделе представлены расчёты энергоэффективности гидравлической системы привода руля высоты (рис. 2), а также рекомендации по её улучшению.

Определим мощность, необходимую для работы гидравлической системы:

$$P_{\text{гидро}} = \frac{P \cdot Q}{\eta_{\text{насоса}}} \cdot 10^{-3}$$

С учётом потерь на трение общая полезная мощность, передаваемая на исполнительный орган, составит:

$$P_{\text{полезное}} = P_{\text{гидро}} \cdot \eta_{\text{трения}}$$

Учитывая потери на дроссельном регулировании:

$$P_{\text{выходное}} = P_{\text{полезное}} \cdot \eta_{\text{дросс}}$$

Суммарный КПД всей гидравлической системы:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{выходное}}}{P_{\text{гидро}}}$$

Для устранения проблем, связанных с низкой энергетической эффективностью, предлагается:

1. Замена дроссельного регулирования на электронные регуляторы расхода. Это позволит сократить потери энергии на этапе регулирования.

2. Использование переменных насосов с регулируемым рабочим объемом, которые обеспечивают подачу жидкости с минимальными потерями энергии.

3. Оптимизация конструкции гидроцилиндров, направленная на снижение трения, что также повысит эффективность передачи энергии.

4. Внедрение системы рекуперации энергии для использования остаточной мощности гидравлической жидкости.

Реализация предложенных мер может значительно сократить энергетические потери в гидравлической системе привода руля высоты. Это не только повысит КПД системы, но и улучшит топливную эффективность летательного аппарата, особенно на этапах длительного крейсерского полёта.

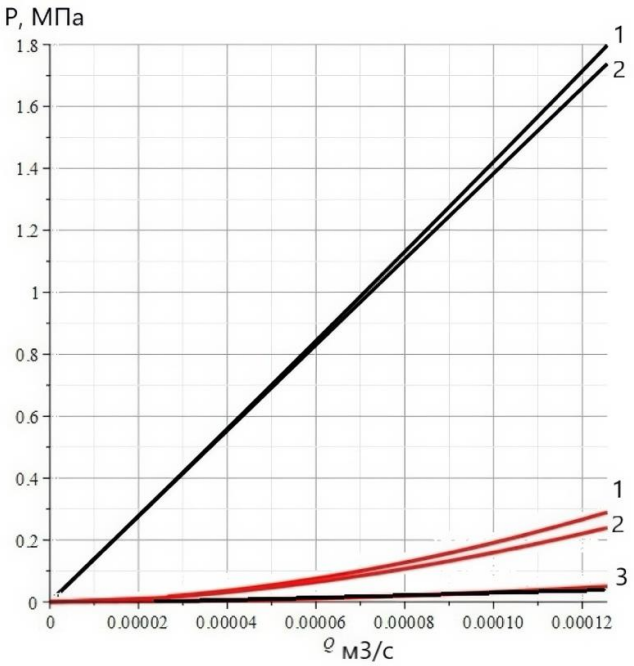


Рис. 3. Характеристика гидравлических потерь на линии нагнетания

Библиографический список

1. Падение рейса 261 авиакомпании Alaska Airlines в Тихий океан [Электронный ресурс] // URL: https://letai.livejournal.com/1717.html?amp=1 (Дата обращения: 15.11.2024).

2. Шумилов, И.С. Системы управления рулями самолётов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С. 425–460.

3. Руль высоты [Электронный ресурс] // URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Руль_высоты (Дата обращения: 15.11.2024).

4. Филатов, Д.М. Исследование и разработка системы управления автономным электрогидравлическом приводом // Электротехнические комплексы и системы.

5. Иванов, А.А. Курсовая работа «Автономный электрогидравлический рулевой привод летательного аппарата», Уфа 2024.

© Иванов А.А., 2024

УДК 621.879

Д.А. КАРПУСЬ
karpus-dmitriy@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент С.Ю. КОНСТАНТИНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ОДНОКОВШОВЫЙ ПОЛНОПОВОРОТНЫЙ ЭКСКАВАТОР

Аннотация: в статье рассматривается одноковшовый полноповоротный экскаватор и его гидравлическая система. Рассмотрены его основные проблемы и приведен расчет гидравлических потерь.
Ключевые слова: экскаватор; гидросистема экскаватора; одноковшовый; гидравлические потери.

Одноковшовый полноповоротный экскаватор является одним из наиболее универсальных и широко используемых типов строительной техники. Эти машины находят применение в различных отраслях, включая строительство, горнодобывающую промышленность, коммунальное хозяйство и сельское хозяйство. Благодаря своей высокой маневренности, производительности и способности выполнять широкий спектр задач, экскаваторы стали незаменимыми инструментами для выполнения земляных работ.

На рис. 1 показана конструктивная схема одноковшового полноповоротного экскаватора.

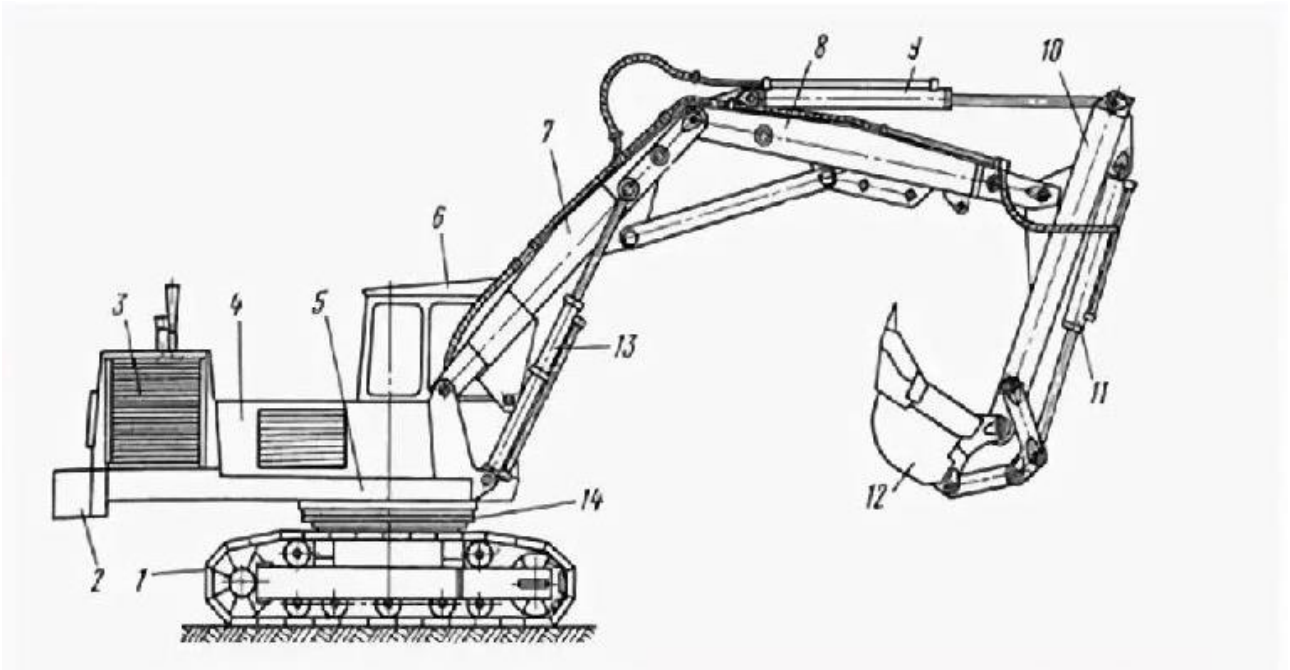


Рис. 11. Экскаватор ЭО-4121 [1]

Гидравлическая система одноковшового полноповоротного экскаватора может сталкиваться с различными проблемами, которые могут влиять на его производительность и безопасность. Вот некоторые из наиболее распространённых проблем:

1. Недостаточное давление: если насос не создает достаточное давление, это может привести к снижению мощности и эффективности работы экскаватора. Причины могут включать износ насоса, загрязнение фильтров или недостаток масла в системе.

2. Загрязнение гидравлической жидкости: загрязнённая или старая гидравлическая жидкость может привести к повреждению компонентов системы, снижению производительности и увеличению износа.

3. Утечки масла: утечки могут происходить из-за износа уплотнителей, повреждения шлангов или соединений. Это может привести к снижению давления в системе и ухудшению работы экскаватора.

4. Невозможность одновременного выполнения нескольких функций: в одноковшовых полноповоротных экскаваторах часто возникает ситуация, когда оператор не может одновременно выполнять несколько операций, таких как поворот платформы и движение стрелы. Это может значительно ограничить эффективность работы экскаватора и увеличить время выполнения задач.

Приведем расчет потерь в гидросистеме. Потери давления жидкости определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{V^2}{2},$$

где λ – коэффициент гидравлических потерь. При ламинарном течении $\lambda = \frac{64}{Re}$, где Re – число Рейнольдса, $Re = \frac{Vd}{v}$. При турбулентном течении $\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$.

Здесь ρ – плотность рабочей жидкости; l – длина трубопровода; d – диаметр трубопровода; V – скорость жидкости.

Расчет потерь ведется в напорных линиях гидросистемы.

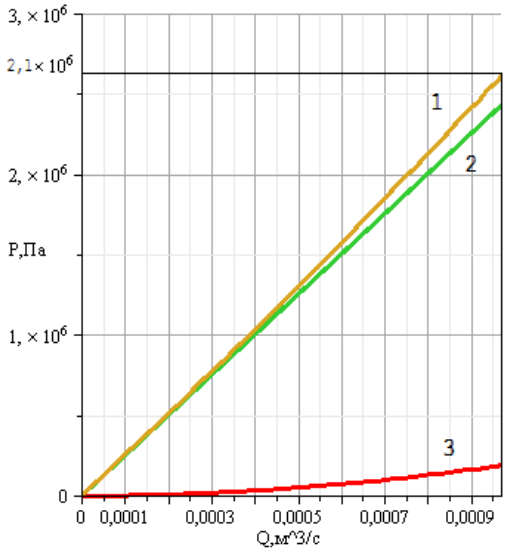


Рис. 2. Потери давления на напорной линии

Одноковшовый полноповоротный экскаватор представляет собой многофункциональную и эффективную машину, способную выполнять широкий спектр задач в различных отраслях. Его конструктивные особенности, такие как полноповоротная система и мощная гидравлика, делают его незаменимым инструментом для выполнения земляных работ. В данной статье проведен расчет гидравлических потерь на напорной линии.

Библиографический список

1. Трактора и техника [Электронный ресурс] // URL: https://agro-tm.ru/ekskavator-eo-4121-tehniceskie-harakteristiki-modifikacii-ustrojstvo-dvigatel-kovs-cena-otzyvy/ (Дата обращения: 14.11.2024).
2. Яковлев, И.С. «Гусеничный одноковшовый строительный экскаватор с гидроприводом. Рабочее оборудование – обратная лопата: выпускная квалификационная работа бакалавра», 2017 г.

© Карпусь Д.А., 2024

УДК 656.06

А.А. КОЛПАКОВ
aak505795@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

VEHICLE-TO-VEHICLE (V2V) И VEHICLE-TO-INFRUSTRUCTURE (V2I) В РАМКАХ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОВЫМИ ПЕРЕВОЗКАМИ

Аннотация: рассматриваются технологии V2V (Vehicle-to-Vehicle) и V2I (Vehicle-to-Infrastructure) коммуникаций, их роль и значение в управлении грузовыми перевозками. Анализируются преимущества и недостатки этих технологий, а также перспективы их развития и внедрения в логистическую отрасль. Особое внимание уделяется примерам успешной реализации V2V и V2I в практике грузовых перевозок, а также вызовам и ограничениям, связанным с их использованием.
Ключевые слова: V2V; V2I; интеллектуальные транспортные системы; автономные транспортные средства.

Технологии Vehicle-to-Vehicle (V2V) и Vehicle-to-Infrastructure (V2I) являются ключевыми компонентами развития интеллектуальных транспортных систем (ITS). Эти технологии позволяют транспортным средствам и объектам

инфраструктуры обмениваться информацией, что способствует повышению уровня безопасности, снижению количества ДТП и оптимизации дорожного трафика [1]. В условиях растущего числа автомобилей и увеличения плотности движения внедрение этих технологий становится необходимым для создания более безопасной и эффективной транспортной среды.

Внедрение технологий V2V и V2I в сферу управления грузовыми перевозками является актуальным, поскольку грузоперевозки занимают ключевое место в экономике, и их эффективность непосредственно сказывается на стоимости товаров [2]. Использование данных технологий способно существенно улучшить логистические процессы, повысить безопасность грузов, а также снизить затраты на перевозку. Это особенно актуально в свете современных вызовов, таких как повышение цен на топливо, необходимость соблюдения экологических норм и требования к повышению скорости доставки. В этой статье будут рассмотрены основные аспекты и преимущества использования технологий V2V и V2I в рамках управления грузовыми перевозками, а также приведены примеры их применения на практике.

Технология V2V позволяет автомобилям обмениваться информацией напрямую друг с другом без необходимости в промежуточных устройствах [3]. Это достигается с помощью беспроводных сетей, через которые передаются сведения о скорости, местоположении и состоянии транспортных средств.

В отличие от V2V, технология V2I предполагает взаимодействие между автомобилями и элементами дорожной инфраструктуры, такими как светофоры, дорожные знаки и системы управления движением. Это даёт возможность не только передавать информацию об условиях на дороге, но и принимать данные от самой инфраструктуры для более эффективного управления движением.

Применение технологий V2V позволяют грузовым автомобилям получать данные о текущем состоянии дорожного движения и загруженности маршрутов. Например, такие системы могут предоставлять данные о пробках, дорожных работах или происшествиях, позволяя водителям выбирать альтернативные маршруты и избегать задержек. Помимо этого, системы V2V способны предупреждать водителей о потенциальных опасностях на дороге, таких как резкое торможение впереди или наличие препятствий. Что касается технологий V2I, они могут использоваться для оптимизации работы светофоров в зависимости от плотности движения грузовых автомобилей, что помогает минимизировать задержки.

Для полноценного функционирования технологий V2V и V2I необходимо специализированное оборудование, включая беспроводные модули связи для передачи данных между транспортными средствами и инфраструктурой, системы глобального позиционирования (GPS) для отслеживания местоположения транспортных средств, а также программное обеспечение, необходимое для обработки информации о движении и принятия решений на основе поступающих данных [4].

Использование технологий V2V и V2I в сфере грузоперевозок предоставляет ряд значительных преимуществ по сравнению с традиционными методами. Так, благодаря V2V технологиям автомобили могут делиться актуальной информацией о дорожной ситуации, предупреждая о потенциальных опасностях, таких как резкое торможение впереди или наличие аварий, что уменьшает вероятность ДТП и повышает общий уровень безопасности на дорогах. Дополнительно V2I системы могут предоставлять данные о текущем состоянии дорожного движения, включая пробки и дорожные работы. Это позволяет грузовым автомобилям выбирать наиболее оптимальные маршруты в реальном времени, снижая общее время в пути и расход топлива [5]. Более эффективное планирование маршрутов и сокращение времени простоя, компании могут значительно сократить операционные расходы, что может привести к снижению затрат на топливо на 20–30% [6].

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение технологий V2V и V2I сопровождается рядом трудностей, связанных с инфраструктурными ограничениями, законодательными вопросами и проблемами кибербезопасности. Инфраструктурные ограничения могут включать в себя необходимость модернизации дорог и установки нового оборудования. Законодательные вопросы могут касаться регулирования обмена данными и защиты конфиденциальности. Важным фактором остается и кибербезопасность, поскольку системы V2V и V2I подвержены риску кибератак.

В Соединенных Штатах Америки активно ведутся разработки стандартов для внедрения технологий V2V и V2I. Департамент транспорта США намерен ввести обязательное оснащение всех новых автомобилей системами V2V и V2I начиная с 2023 года. Это демонстрирует серьёзный настрой на интеграцию данных технологий в транспортную инфраструктуру страны [7]. В Министерстве транспорта США подсчитали, оценили, что использование систем V2V / V2I может предотвратить до 70–80% дорожно-транспортных происшествий, что эквивалентно спасению около 20 тысяч жизней ежегодно [8].

Ожидается, что в ближайшие годы технологии V2V и V2I будут играть всё более важную роль в управлении грузовыми перевозками. Их внедрение позволит создать более эффективные и безопасные транспортные системы, которые будут способствовать развитию экономики и повышению качества жизни.

Существует несколько успешных примеров применения технологий Vehicle-to-Vehicle (V2V) и Vehicle-to-Infrastructure (V2I) в грузовых перевозках, которые демонстрируют их эффективность и потенциал для улучшения логистических процессов.

Одним из наиболее успешных примеров применения технологии V2V является система Platooning, разработанная компанией Volvo [9]. Эта система позволяет нескольким грузовикам двигаться в колонне на небольшом

расстоянии друг за другом, при этом автоматически поддерживается нужная дистанция и скорость. Такой подход снижает потребление топлива и повышает безопасность на дорогах. Система использует данные с датчиков и камер для измерения дистанции и скорости между машинами, а также для координации движения всей колонны.

Преимущества системы Platooning включают:

– снижение расхода топлива за счёт оптимизации движения колонны;

– повышение безопасности на дороге благодаря автоматическому поддержанию дистанции;

– улучшение управления грузовыми потоками за счёт более эффективного использования дорог.

Однако существуют и некоторые ограничения системы Platooning, такие как необходимость установки дорогостоящего оборудования на транспортные средства и сложность интеграции с существующими системами управления транспортом.

Ещё одним успешным примером применения технологии V2I являются интеллектуальные системы управления трафиком. Они используют данные от транспортных средств для оптимизации трафика на дорогах, что позволяет грузовым автомобилям выбирать наиболее эффективные маршруты и избегать пробок. Системы управления трафиком могут обмениваться данными о дорожной ситуации, пробках и авариях, что помогает водителям принимать более обоснованные решения [10].

Эти примеры демонстрируют, как технологии V2V и V2I могут быть успешно интегрированы в процессы грузовых перевозок.

Таким образом, технологии V2V и V2I имеют большой потенциал для улучшения управления грузовыми перевозками. Они могут повысить безопасность, оптимизировать маршруты, снизить затраты и улучшить логистику. Однако для их успешного внедрения необходимо решить ряд технических, правовых и экономических вопросов.

Библиографический список

1. Вестник СПбГУТ. Инфокоммуникационные сети и системы [Электронный ресурс]. URL: https://vestnik-sut.ru/02-infokommunikatsionnie-seti-i-sistemi.html (дата обращения: 12.11.2024).

2. Транспортное средство в транспортное средство (V2V) / Транспортное средство в инфраструктуру (V2I) Размер рынка, 2032 Доклад [Электронный ресурс]. URL: https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/vehicle-to-vehicle-v2v-vehicle-to-infrastructure-v2i-market (дата обращения: 12.11.2024).

3. На пути к созданию сетей взаимного общения автомобилей и дорожной инфраструктуры [Электронный ресурс]. URL: https://www.infoprocess.ru/downloads/v2v.pdf (дата обращения: 12.11.2024).

4. ПНСТ 388-2019 Интеллектуальные транспортные системы. Основные требования в отношении сетевого взаимодействия транспортных средств с высокой степенью автоматизации управления с инфраструктурой [Электронный ресурс]. URL: (V2I) https://docs.cntd.ru/document/1200171911 (дата обращения: 12.11.2024).

5. Аналитический обзор подходов к построению моделей V2X-систем [Электронный ресурс]. URL: https://vestnik-sut.ru/02-infokommunikatsionnie-seti-i-sistemi.html (дата обращения: 12.11.2024).

6. Эффективные отечественные практики применения технологий искусственного интеллекта в сфере транспорта и логистики [Электронный ресурс]. URL: https://files.data-economy.ru/Docs/Effektivnye_otechestvennye_praktiki_primeneniya_technologiy_ii_v_sfere_transporta_i_logistiki.pdf (дата обращения: 12.11.2024).

7. Американские машины начнут «говорить» друг с другом к 2023 году [Электронный ресурс]. URL: https://nplus1.ru/news/2016/12/14/v2v (дата обращения: 12.11.2024).

8. В США готовится отраслевой стандарт о внедрении V2V / V2I в легковых автомобилях – CNews [Электронный ресурс]. URL: https://www.cnews.ru/news/top/v_ssha_gotovitsya_otraslevoj_standart (дата обращения: 12.11.2024).

9. Платунинг – Википедия [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Платунинг (дата обращения: 12.11.2024).

10. Самостоятельный город: 3 технологии «разумного» управления дорожным движением / Хабр [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/wayray/articles/374033/ (дата обращения: 12.11.2024).

© Колпаков А.А., 2024

УДК 62-522.2

К.И. КОРОБОВ
kirill.korobov.03@list.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент. С.Ю. КОНСТАНТИНОВ

Уфимский университет науки и технологий

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ГУСЕНИЧНОГО ДВУХЗВЕННОГО ВЕЗДЕХОДА

Аннотация: в статье рассматривается разработка автоматизированной системы управления гидравлической трансмиссией гусеничного двухзвенного

вездехода. Описываются ключевые компоненты системы, включающие гидравлическую трансмиссию, исполнительные механизмы и алгоритмы управления.

Ключевые слова: автоматизированная система управления; гидравлическая трансмиссия; гусеничный двухзвенный вездеход.

Гидравлическая трансмиссия является основополагающим элементом конструкции гусеничных двухзвенных вездеходов, обеспечивая их способность передвигаться по сложным рельефам и преодолевать различные преграды. Автоматизированная система представляет собой комплексную систему, состоящую из нескольких ключевых компонентов.

Основные компоненты автоматизированной системы включают в себя: гидравлическую трансмиссию; систему управления; исполнительные механизмы; управляющие алгоритмы.

Проблемы автоматизированной системы управления:

1. Сложность согласования работы звеньев: для эффективного управления движением двух звеньев требуется точная синхронизация гидроприводов, что усложняется изменениями нагрузки и состоянием дороги.

2. Энергоэффективность: гидравлические системы сталкиваются с потерями энергии из-за трения и утечек; поддержка оптимальных условий работы в условиях изменяющихся нагрузок представляет собой сложную задачу.

3. Интеграция с другими системами: необходимость координации работы гидравлической системы с навигационными, управляющими и диагностическими системами вездехода может усложнить как конструкцию, так и эксплуатацию.

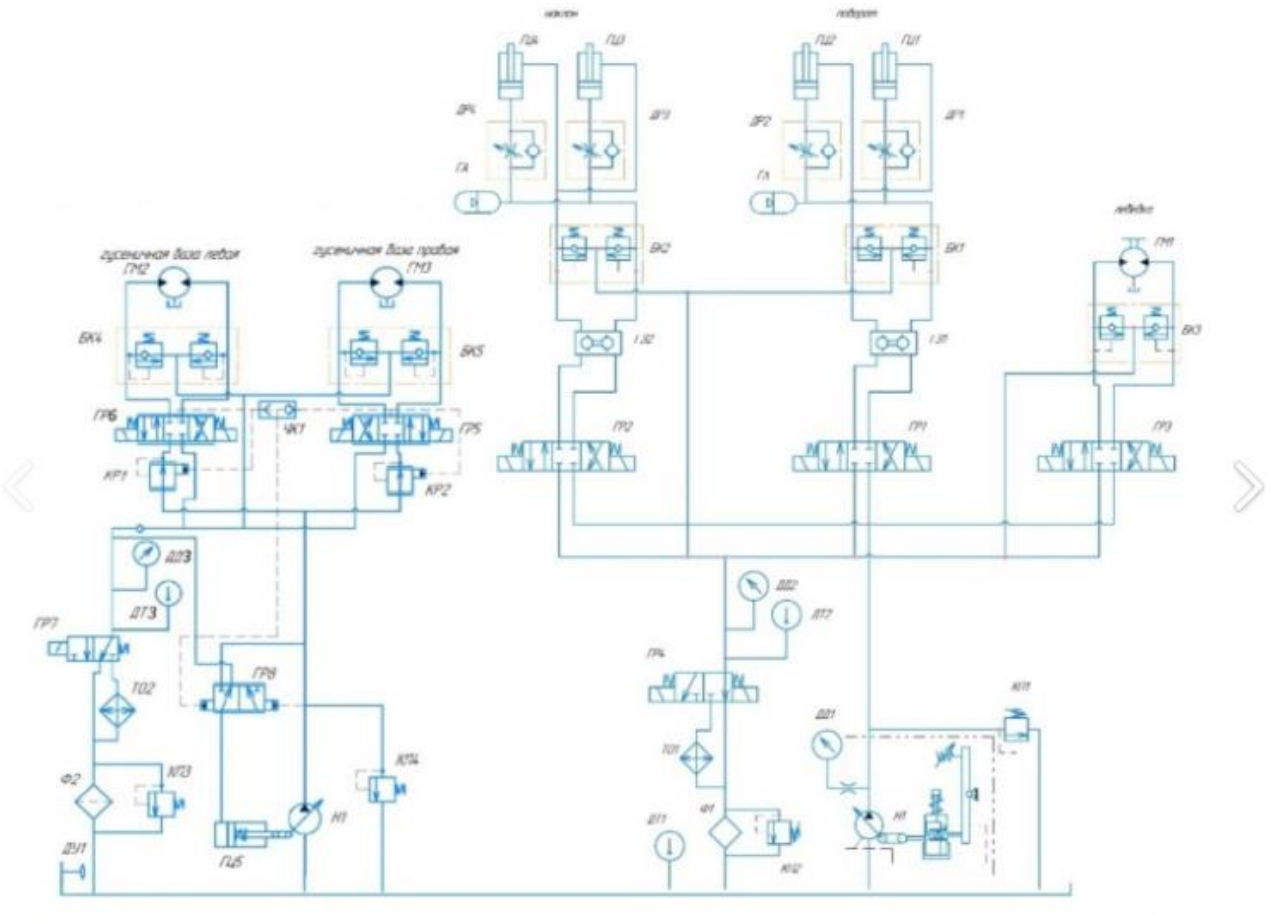


Рис. 1. Гидравлическая схема гусеничного двухзвенного вездехода

Принцип работы:

1. Оператор управляет вездеходом с помощью джойстиков или других устройств ввода. Сигналы от них поступают в электронный блок управления.

2. Электронный блок управления анализирует полученные данные и вычисляет необходимые управляющие воздействия.

3. Контроллер отправляет команды на распределительные клапаны, которые открывают или закрывают каналы подачи масла к гидромоторам и тормозам.

4. Гидромоторы преобразуют кинетическую энергию потока масла в механическое движение ведущих колес или гусениц.

5. Тормозные механизмы активируются при необходимости замедлить или остановить движение гусеничных звеньев.

Компоненты системы управления:

1. Электронные блоки управления: содержат микропроцессоры, принимающие сигналы от датчиков и оператора, обрабатывающие их и выдающие команды на исполнительные механизмы.

2. Датчики: измеряют различные параметры (скорость, положение, нагрузку) и передают эту информацию в электронный блок для обработки.

3. Устройства ввода: джойстики, педали, кнопки и другие элементы, позволяющие оператору управлять движением машины.

4. Интерфейсы связи: обеспечивают взаимодействие между различными компонентами системы управления, включая датчики, исполнительные механизмы и электронные блоки.

Исполнительные механизмы являются составными частями системы управления гидравлической трансмиссией, отвечающими за выполнение механических действий в соответствии с указаниями, поступающими от управляющего устройства. Для гусеничного двухзвенного вездехода важнейшими исполнительными механизмами являются:

1. Гидравлические насосы: создают необходимое давление в гидравлической системе и перекачивают рабочую жидкость (обычно масло) ко всем компонентам трансмиссии.

2. Распределительные клапаны: регулируют потоки рабочей жидкости, перенаправляя её к различным частям трансмиссии. Это позволяет изменять скорость и направление движения гусениц, а также осуществлять маневры поворота и торможения.

3. Гидромоторы: преобразуют энергию потока жидкости в механическую, что приводит в движение ведущие колеса или гусеницы.

4. Тормозные механизмы: предназначены для замедления или полной остановки движения гусеничной ленты. Они могут иметь дисковую или барабанную конструкцию, в зависимости от специфики системы.

Алгоритмы управления определяют порядок операций, которые выполняет система управления для достижения задач, поставленных оператором. К основным алгоритмам относятся:

1. Регулировка скорости: изменение скорости движения гусеничного элемента достигается путём регулирования объёма подачи масла к гидромоторам.

2. Алгоритмы поворота: управление направлением движения техники осуществляется путём изменения скоростей вращения гусениц между собой. Одна из гусениц может замедляться или останавливаться.

3. Торможение: скоростное снижение или полное прекращение движения гусеничных машин происходит за счёт активации тормозных механизмов.

4. Обратная связь: сбор информации с различных сенсоров (датчиков положения, скорости, нагрузки) и последующая обработка этих данных для корректировки управляющих воздействий, что гарантирует стабильность и точность выполнения задач.

Автоматизированная система управления гидравлической трансмиссией гусеничного двухзвенного вездехода представляет собой современное решение, обеспечивающее высокий уровень управляемости, надёжности и безопасности при сложных условиях эксплуатации. Эта система интегрирует последние достижения в гидравлике, электронике и программировании, что способствует значительному повышению эффективности работы транспортного средства.

Библиографический список

1. Попов, Д.Н. Динамика регулирования гидро- и пневмосистем: учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1976. – 424 с. [D.N. Popov, Dynamics of regulation of hydro-and pneumatic systems, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1976.].
2. Математическое моделирование рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с гидравлической обратной связью / А.И. Ильин [и др.] // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1 (54). С. 73–78.
3. Анализ и синтез системы управления гидравлической трансмиссии двухзвенного гусеничного снегоболотохода на основе имитационного моделирования / Д.З. Хуснутдинов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2020. Т. 24, № 4 (90). С. 133–139.

© Коробов К.И., 2024

УДК 656.13.08

К.И. ЛУКЬЯНЧИКОВ
kir.minion@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

КОНЦЕПЦИЯ «УМНЫЙ АВТОМОБИЛЬ»

Аннотация: статья посвящена обзору применения современных технологий и искусственного интеллекта в автомобильной отрасли.
Ключевые слова: автомобиль; искусственный интеллект; беспилотные автомобили; технологии; умные ткани; компьютеры; модульный автомобиль; мультимедиа; система распознавания.

Умные автомобили при первом упоминании ассоциируются с беспилотными машинами, где водителю представляется возможность полностью контролировать работу всех активных систем, при этом даже не принимая участия в управлении.

Лидерами в разработке и внедрении всё новых систем в автомобильную отрасль являются концерны Mercedes-Benz, Toyota, Tesla и многие другие. Каждый день в новостных заголовках появляются статьи о тестировании очередного беспилотного автомобиля. И, без сомнений, эти технологии в ближайшем будущем будут интегрированы во все новые автомобили и намного чаще будут массово появятся на дорогах. Учитывая тенденции

последних лет, скорее всего, сначала на дорогах появятся беспилотные грузовые автомобили дальнего следования, за ними общественный транспорт, и только после этого столь сверхтехнологичные автомобили появятся у простых людей.

В большую часть современных автомобилей уже интегрирована такая технологичная система, как искусственный интеллект (ИИ). Многие водители, чьи автомобили обладают ИИ, уже освоили и привыкли к данному нововведению, зачастую даже не осознавая всех механизмов работы систем своего автомобиля. К таким функциям можно отнести помощь при парковке и вождении, индивидуальные настройки сиденья для водителя и каждого пассажира, а также адаптивную навигацию в процессе движения.

Обобщая, можно уверенно сказать, что век умных автомобилей уже наступил. Сегодня практически любая функция бортового компьютера автомобиля позволяет причислить машину к современному гаджету.

Помощь при вождении и парковке

На сегодняшний день в базовое оснащение большинства автомобилей входят некоторые системы помощи на дорогах. Одна из них, и наиболее распространенная, ABS (Anti-lock braking system). При резком торможении она не допускает блокировку колес, обеспечивая устойчивость на дороге. Вращение колес отслеживается встроенными датчиками, передающими информацию на центральный блок управления (бортовой компьютер). Если скорость резко замедляется, система активирует специальные тормозные клапаны. Чаще всего ABS помогает водителям при движении по скользящим поверхностям, как, например, гололед.

Также одной из атрибутивных систем умных автомобилей является устройство ограничения скорости. Его работа базируется на том, что бортовой компьютер сканирует по ходу движения дорожные знаки, при этом параллельно сверяясь с данными спутниковых карт, и в случае превышения установленного скоростного режима уменьшает подачу топлива в двигатель, тем самым замедляя автомобиль.

Более продвинутой и технологичной системой помощи водителю считается ADAS (Advanced Driver Assistance Systems). Эта система предназначена для помощи, главным образом, при парковке и в движении. При экстремальном приближении к препятствию специальные встроенные в корпус датчики определят препятствие и могут оперативно остановить машину при парковке или замедлить её в процессе движения. Например, если при движении в потоке водитель захочет перестроиться и занять соседний ряд, при этом возникнет угроза столкновения, то ADAS не даст возможности сделать это.

Ещё стоит упомянуть и системы автоматической парковки, которые не только сигнализируют о препятствиях, но и самостоятельно в этот момент управляют машиной, не требуя вмешательства водителя и, в то же время, не запрещая ему перехватывать управление.

Умные ткани

Как это обычно и бывает, различные высокотехнологичные ткани и волокна появляются в нашей жизни далеко не сразу. Лишь спустя пять-десять лет они могут пройти весть путь от разработки до бытовых вещей. Например, среди подобных можно выделить кевлар. Это пара-арамидное волокно, обладающее сверхвысокой прочностью.

Впервые кевлар был разработан американской химической компанией Dupont в 1964 году. Поначалу его использовали в космической индустрии, затем кевлар добрался до автомобильных покрышек и костюмов для мотоциклистов в виде вставок в наколенники и налокотники. Но больше всего он оказался эффективен в военных и полицейских бронежилетах из-за своих защитных и анти-рикошетных свойств. Также он на пару с карбоновым волокном широко применим и в сфере изготовления аэродинамичных и лёгких кузовов спортивных автомобилей.

А уже сегодняшние разработки Dupont обещают в ближайшем будущем подарить этому миру ткани с технологией передачи сигналов о местоположении и даже самочувствии водителя.

Но даже это не предел изобретательности, ведь в разработке также находятся и ткани «скорая помощь», которые по задумке производителей должны в случае перелома формировать на поврежденной конечности подобие гипсовой повязки, фиксирующей её в неподвижном состоянии.

Следующим шагом развития умных тканей станет измерение показателей биофизического состояния водителя. Эта система не допустит возможность пользования автомобилем при слишком высоком утомлении или нетрезвом состоянии. Автомобиль просто не позволит завести двигатель.

Вектор развития новых технологий не в последнюю очередь определяет и законодательство. К примеру, перечень новых законов в американском автомобилестроении об активной безопасности людей в машине подтолкнул учёных к созданию новых типов тканей с распознаванием роста и веса пассажира, а также дальнейшей передачей информации на бортовой компьютер автомобиля для корректировки давления во время надувания подушек безопасности для уменьшения травмоопасности детей.

Умные ткани по праву можно считать новой ступенью развития синтетической промышленности, ведь без преувеличений они являются уникальными по своим свойствам материалами. Они одновременно легкие и прочные, тонкие и теплоизоляционные, непромокаемые и «дышащие».

В качестве примера можно привести ткань GoreTex, в квадратном сантиметре которой умещается свыше миллиарда мелких пор, позволяющих телу дышать, и при этом, не пропуская под одежду крупные капли воды. А ткань Polartec намного лучше удерживает тепло тела, чем шерсть, но при этом не заставляет человека потеть. В научном сообществе такие материалы получили название «ткани переменной фазы».

Модульный автомобиль-трансформер

Из-за нынешней тенденции иметь в семье два и более автомобилей городская инфраструктура стремительными темпами переполняется транспортом, из-за чего становится актуальной идея разработки модульных автомобилей, способных менять свои габаритные параметры под условия окружения. В связи с этим многие автопроизводители предлагают концепты модульных систем, позволяющих поменять вид и даже тип авто.

Так, совсем недавно швейцарское дизайнерское бюро Rinspeed предложило идею автомобиля, состоящего из универсальной платформы-шасси со сменной капсулой.

Также не менее интересную идею предложила компания Renault в модели Morphoz, электромобиля с изменяемой геометрией кузова и колёсной базы. Салон может адаптироваться под большее количество пассажиров благодаря выдвижной кабине с подвижными сиденьями.

Сам автомобиль имеет 2 режима: городской и путешествия. В городском режиме машина становится компактнее за счёт укорачивания капота и загиба заднего бампера, упрощая передвижение по узким улицам и облегчая парковку. А в режиме путешествия машина, наоборот, расширяется. Это позволяет увеличить пространство под багаж и вместить большее количество пассажиров. Также появляется место для дополнительного аккумулятора с запасом хода на 700 км.

Мультимедиа без границ

Даже такой элемент автомобиля как мультимедиа не остался без изменений. Многие ошибочно полагают, что эти системы до сих пор являются простыми проигрывателями. На самом деле их функциональность уже давно эволюционировала и ушла далеко вперёд.

Так, автоконцерны Kia и Hyundai с 2019 года оснащают свои автомобили виртуальным ассистентом со встроенным искусственным интеллектом, который общается с пассажирами, а также в случае необходимости следит за здоровьем водителя и предупреждает его о возможных опасностях.

Перед поездкой новый тип мультимедийной системы автомобиля проверит состояние и самочувствие водителя. А в поездке поможет настроить музыку, климат-контроль, круиз-контроль и прочие удобства автомобиля. Для занятых людей будет полезна возможность прямо по дороге на работу составить планы на день. При этом водитель может даже не касаться экрана мультимедиа, так как система сможет самостоятельно распознать голос и жесты водителя.

Подводя итоги, можно с уверенностью сказать, что многие функции, облегчающие вождение, и делают наши автомобили «умными». Те же встроенные в программное обеспечение автомобиля голосовые помощники позволяют водителю сконцентрироваться на дороге, не отвлекаясь на переключение мультимедиа или регулировку кондиционера. Системы непосредственно помощи водителю, как ABS и ADAS быстрее помогают

новым водителям привыкнуть к процессу вождения, значительно повышая общий уровень безопасности для всех участников дорожного движения.

Библиографический список

1. Умные автомобили: как работает ИИ в авто и к чему это приведет [Электронный ресурс]: https://rb.ru/story/ai-auto/. Доступ 10.11.2024.
2. Умные авто завтрашнего дня – ключевые тренды [Электронный ресурс]: https://media.mts.ru/technologies/175858/. Доступ 10.11.2024.
3. Умные автомобили [Электронный ресурс]: https://compress.ru/article.aspx?id=18305. Доступ 10.11.2024.

© Лукьянчиков К.И., 2024

УДК 621.22-546

О.П. МАМЫКИН, Т.Х. САДЫКОВ
omamukin@bk.ru, timursadykov79@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГИДРОУСИЛИТЕЛЯ РУЛЕВОГО ПРИВОДА РУЛЯ НАПРАВЛЕНИЯ ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЁТА

Аннотация: в статье представлено численное моделирование гидропривода с электрогидроусилителем рулевого привода руля направления гражданского самолёта. Исследуется влияние безразмерных постоянных времени на качество переходных процессов.
Ключевые слова: рулевой привод; математическая модель; руль направления; самолёт.

Сервоприводы летательных аппаратов (ЛА) функционируют как исполнительные механизмы, которые перемещают органы управления в соответствии с указаниями автопилота. Эти устройства представляют собой сложные замкнутые автоматизированные системы и относятся к категории силовых следящих приводов.

С введением в практику электронных вычислительных машин (ЭВМ) и программных средств для численного моделирования математическое моделирование рабочих процессов стало ключевым элементом в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах. С помощью использования математических моделей и проведения численных

экспериментов можно существенно сократить время и затраты на создание гидроприводов. Далее будет рассмотрена схема сервопривода, который применяется на летательном аппарате, а также ее математическая модель.

В качестве объекта моделирования рассматривается электрогидравлический усилитель (рис. 1).

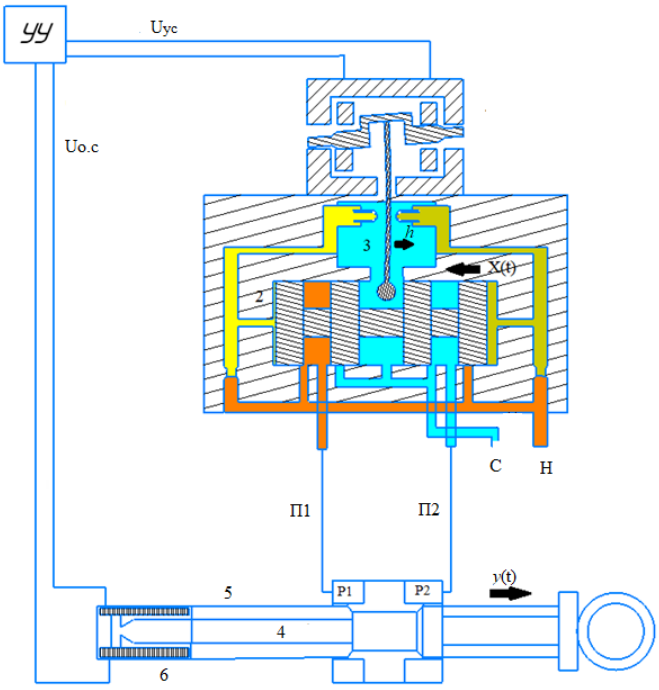


Рис. 1. Электрогидравлический рулевой привод

Математическая модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений, с учетом стандартных допущений.

Математическая модель включает в себя нижеследующее.

Уравнение электрической цепи:

$$U_y - \frac{K_{oc} \cdot I_y}{\Delta y} = L \cdot \left(\frac{d}{dt} \cdot I_y\right) + R_{om} \cdot I_y,$$

где U_y – входящее напряжение; K_{oc} – коэффициент обратной связи; I_y – входящий ток; R_{om} – сопротивление; L – расстояние от центра заслонки до сопел.

Уравнение момента на якорь ЭМП:

$$K_{ml} \cdot I_y = J_{ya} \cdot \frac{d^2}{dt^2} \cdot \alpha + K_{tr} \cdot \left(\frac{d}{dt} \cdot \alpha\right) + C_{emp} \cdot \alpha - K_{oc} \cdot y + M_{gd},$$

где K_{ml} – коэффициент момента по току; J_{ya} – момент инерции якоря; α – угол отклонения якоря; C_{emp} – коэффициент жёсткости якоря.

Уравнение баланса расхода ГУ:

$$K_{qh} \cdot h - K_{qp} \cdot \Delta P_z = A_{zol} \cdot \left(\frac{d}{dt} \cdot x\right) + \frac{(V_{zol} \cdot \Delta P_z)}{2 \cdot E},$$

где K_{qh} – коэффициент демпфирования; ΔP_z – перепад давления в полостях золотника; A_{zol} – площадь золотника; V_{zol} – объём золотника; E – модуль объёмной упругости.

Уравнение движения золотника:

$$m_{zol}\cdot\frac{d^2}{dt^2}\cdot x = \Delta P_z\cdot A_{zol} - C_{zol}\cdot x - K_{tr}\cdot\frac{d}{dt}\cdot x,$$

где m_{zol} – масса золотника; x – перемещение золотника; C_{zol} – коэффициент жёсткости золотника; K_{tr} – коэффициент трения.

Уравнение баланса расхода:

$$\mu\cdot b_{ok}\cdot\Delta x\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\left|P_p - P_1\right|} = A_{zol}\cdot\left(\frac{d}{dt}\cdot y\right) + \frac{V}{2\cdot E}\cdot\left(\frac{d}{dt}\cdot\Delta P_z\right),$$

где μ – коэффициент расхода; P_p – давление питания.

Уравнение движения золотника:

$$m_{gc}\cdot\left(\frac{d^2}{dt^2}\right)\cdot y = A_{gc}\cdot P_{gc} - R - K_{tr}\cdot\left(\frac{d}{dt}\cdot y\right),$$

где m_{gc} – масса гидроцилиндра; A_{gc} – площадь гидроцилиндра.

Результаты численного моделирования в безразмерном виде представлены на рис. 2, 3 и 4.

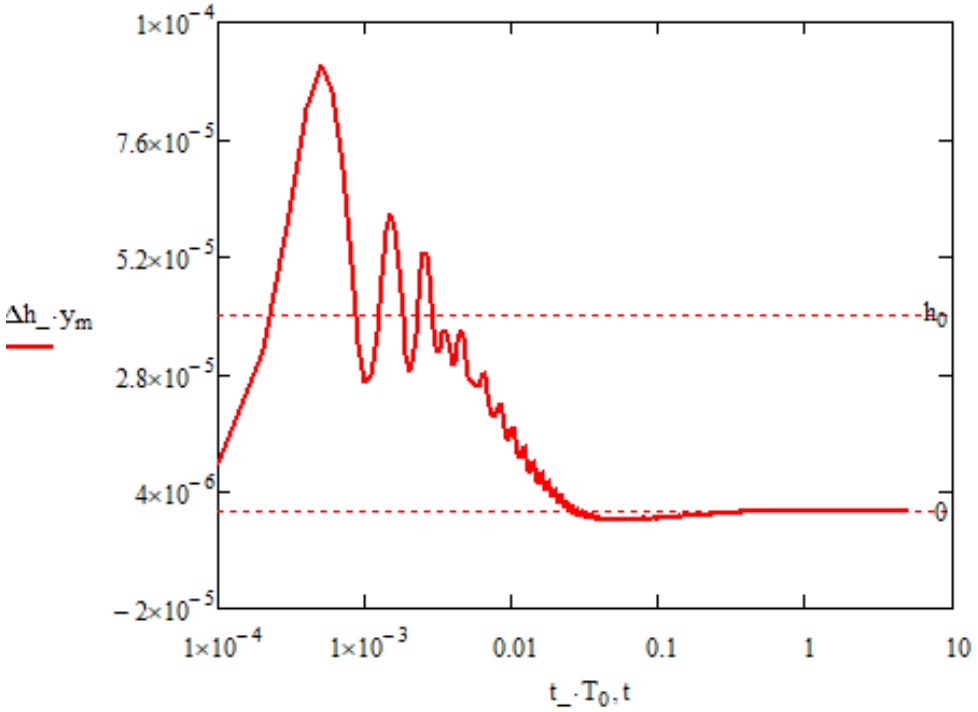


Рис. 2. Перемещение заслонки

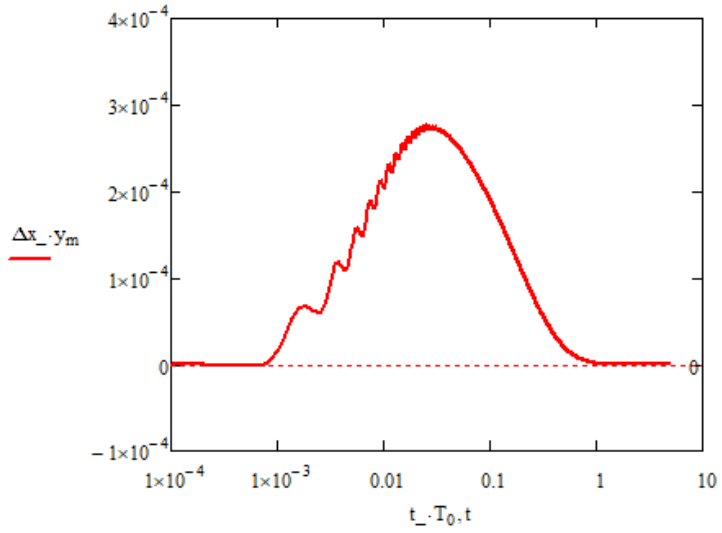


Рис. 3. Перемещение золотника

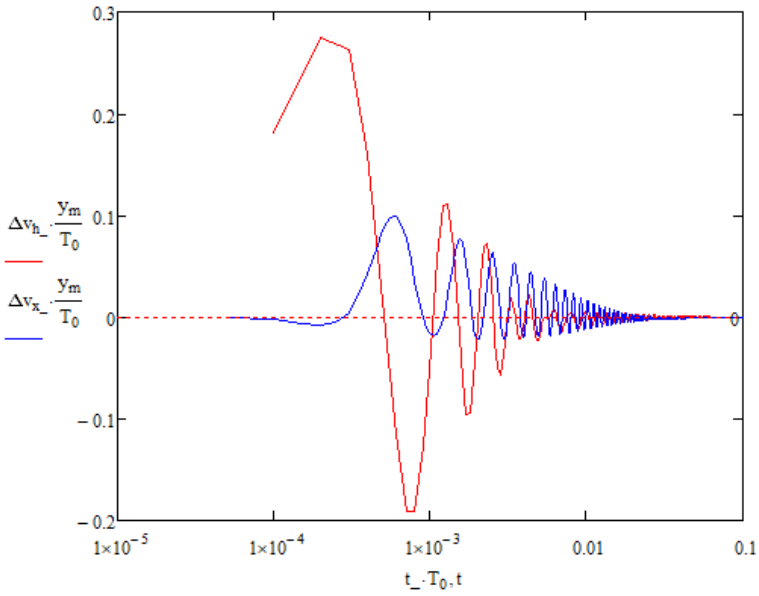


Рис. 4. Скорости перемещения заслонки и золотника

Далее исследуем влияние параметров $T_з$ и T_{gy}, результаты представлены на рис. 5 и 6.

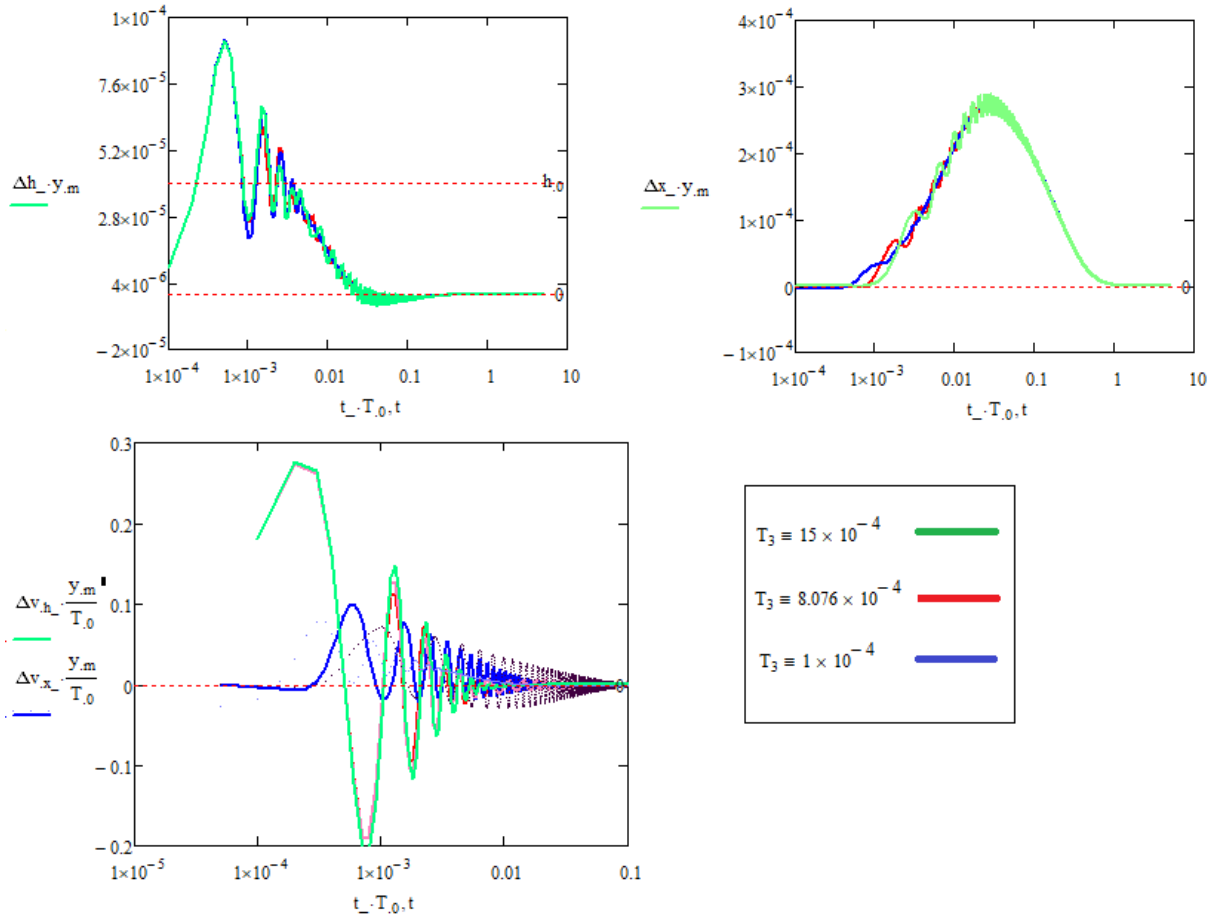


Рис. 5. Влияние $T_з$ на переходные процессы ЭГУ2

На рис. 5 демонстрируется, что с ростом параметра постоянной времени золотника $T_з$ от $1 \cdot 10^{-4}$ до $15 \cdot 10^{-4}$ возрастает колебательность переходного процесса, связанного с перемещением заслонки и поршня, а также увеличивается скорость их перемещения и скорость гидроцилиндра. Время достижения устойчивого режима также увеличивается.

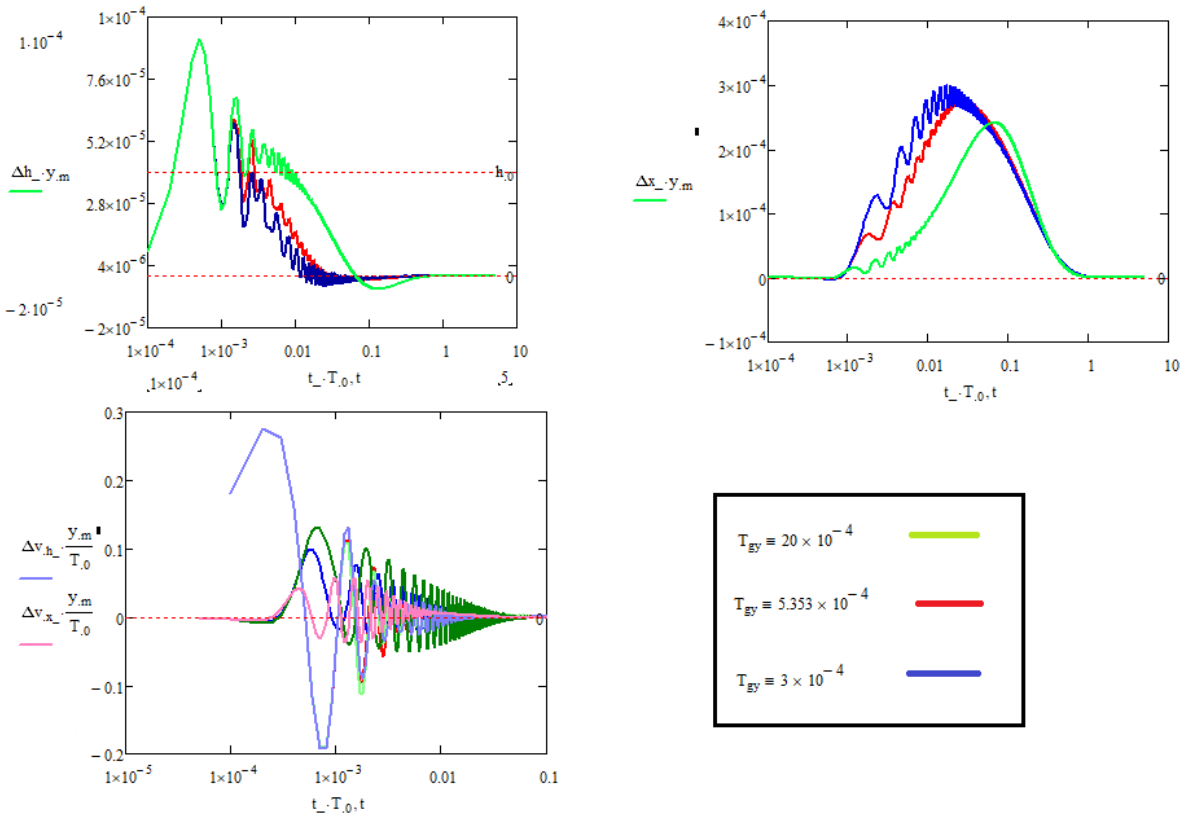


Рис. 6. Влияние T_{gy} на переходные процессы ЭГУ2

На рис. 6 можно заметить, что при увеличении параметра гидравлической постоянной времени гидроусилителя от $1 \cdot 10^{-4}$ до $20 \cdot 10^{-4}$ увеличивается колебательность переходного процесса перемещения заслонки и поршня гидроцилиндра. Время выхода на режим увеличивается.

В этой статье был рассмотрен гидравлический привод с электро-дистанционным управлением, представлена его структурная схема и математическая модель. Модель подробно описывает функционирование системы и учитывает различные параметры. Графики переходных процессов, полученные в ходе моделирования, позволяют анализировать динамику работы гидропривода и выявлять потенциальные проблемы. Графики зависимостей предоставляют возможность оптимизировать систему и повысить её эффективность.

Разработанная математическая модель может быть использована для дальнейших исследований в области гидроприводов и авиационной техники, а также для повышения безопасности и надежности гражданских самолетов. Эта модель может быть применена при проектировании рулевых приводов для гражданских самолётов.

Библиографический список

1. Петров, П.В., Целищев, В.А. Основы алгоритмического моделирования нелинейных гидромеханических устройств: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2012. – 137 с. [P.V. Petrov, V.A. Tselischev, Bases of nonlinear hydromechanical devices algorithmic modeling, (in Russian). Ufa: Ufa state aviation technical university, 2005.

2. Коева, А.А., Петров, П.В., Целищев, В.А. Концепция исследований устройств гидроавтоматики сложных энергетических систем // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 5 (50). С. 103–108. [A.A. Koeva, P.V. Petrov and V.A. Tselischev, «Concept of compound energy systems hydroautomatic devices researches» (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 16, no. 5 (50), pp. 103–108, 2012.]

3. Кудерко, Д.А., Целищев, В.А., Целищев, Д.В. Перспективы развития приводов рулевых поверхностей гражданского самолета // Вестник ПНИПУ. 2021. № 67. С. 70–84.

© Мамыкин О.П., Садыков Т.Х., 2024

УДК 681.521.34

О.П. МАМЫКИН, Т.Х. САДЫКОВ
omamukin@bk.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент С.Ю. КОНСТАНТИНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА В ГИДРОСИСТЕМАХ

Аннотация: приведены результаты исследования различных типов регулятора расхода, принцип работы и сфера применения.
Ключевые слова: регулятор расхода; гидроагрегат; гидросистема.

В малогабаритной технике, промышленности в нефти и газопромысловом оборудовании рабочие органы машины приводятся в движение гидроцилиндрами или гидромоторами с определённой скоростью или частотой вращения соответствующим определённым техническим требованиям. Для изменения скорости гидроагрегатов штоков гидроцилиндров и частоты вращения гидромоторов используется гидроаппаратура, управляющая расходом рабочей жидкости. Существуют различные конструкции и принципы действия: делители и сумматоры потоков; дроссели нерегулируемые и регулируемые; регуляторы расхода двухлинейные с изменяемым расходом на выходе и со стабилизацией в зависимости от температур; трёхлинейные с изменяемым расходом на выходе, со сливом избыточного расхода в другую гидролинию или в бак гидросистемы.

Целью данной статьи является рассмотрение разных типов и конструкций регулятора расхода, изучение различных типов конструкций и применение их в различных гидросистемах.

Регулятор расхода в гидросистемах используют для изменения скорости движения штоков гидроцилиндров или приводных валов гидромоторов гидроаппаратуры, управляющие расходом рабочей жидкости. Конструктивно их делят на два типа: дросселирующие и регулирующие. Дросселирующие предназначены управлять расходом рабочей жидкости путём создания гидравлического сопротивления потока. Регулирующие предназначены управлять расходом для поддержания заданного значения расхода рабочей жидкости независимо от значения перепада давлений. К регулирующим гидравлическим устройствам относятся двухлинейные регуляторы расхода с переменным выходным расходом и стабилизацией в зависимости от температуры рабочей жидкости, а также трёхлинейные регуляторы с переменным выходным расходом и сбросом избыточного расхода в другую гидролинию или гидробак.

Основные виды регуляторов расхода:

1. Двухлинейные. Имеют изменяемый расход на выходе и стабилизацию в зависимости от температуры рабочей жидкости. Двухлинейные регуляторы расхода включают в себя регулируемый дроссель и клапан с постоянным перепадом давления (рис. 1). В качестве дросселя применяется турбулентный тип. Расход рабочей жидкости через дроссель при фиксированном проходном сечении стабилизируется практически на постоянном уровне благодаря клапану, который поддерживает неизменный перепад давления на дросселе. При изменении давления p_2 в выходной линии регулятора, например, при его увеличении, золотник клапана перемещается вниз, увеличивая рабочую щель h. Это приводит к повышению давления p_3, что, в свою очередь, помогает поддерживать постоянную разность давлений и, соответственно, стабильный расход рабочей жидкости. Давление на входе в регулятор расхода остаётся неизменным и определяется настройками напорного клапана, который функционирует в режиме перелива. Погрешность в поддержании постоянного расхода обусловлена изменением усилия пружины в результате движения золотника.

2. Трёхлинейные. Обеспечивают изменяемый расход на выходе, а также слив избыточного расхода в другую гидролинию или в бак. Трехлинейные регуляторы расхода (рис. 2) состоят из регулируемого дросселя и напорного клапана, который установлен параллельно ему и функционирует в режиме переливания. Этот клапан поддерживает постоянный перепад давления на дросселе, что обеспечивает стабильный расход. Часть потока, который дроссель не способен пропустить, сливается через переливной клапан. Характерной чертой трехлинейного регулятора является зависимость давления p_1 на входе от давления p_2 на выходе, что позволяет насосам работать при переменном давлении, которое варьируется в зависимости от нагрузки на гидродвигателе.

Это преимущество способствует повышению экономичности насосной установки, однако не позволяет одновременно управлять движением нескольких гидродвигателей.

По способу управления расходом регуляторы могут быть:

– с ручным управлением (от поворотной кнопки или рукоятки);
– с механическим управлением (от ролика с возвратной пружиной);
– с электрическим управлением (на входе от электромагнита).

Также регуляторы расхода могут различаться по присоединению:

– встраиваемые в монтажные гнёзда корпусных деталей;
– ввинчиваемые (обычно резьбового присоединения);
– модульные (соединяемые с другими гидроустройствами каналами, выведенными на две параллельные наружные плоскости).

Принцип работы рассмотрим на примере гидромеханического регулятора расхода прямого действия, основанный на поддержании постоянного перепада давления жидкости на дросселе (рис. 3).

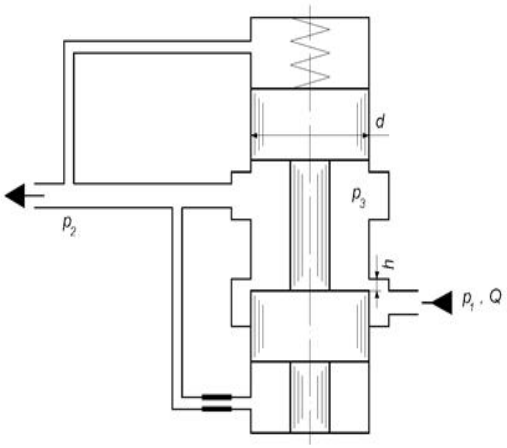


Рис. 1. Схема двухлинейного регулятора расхода

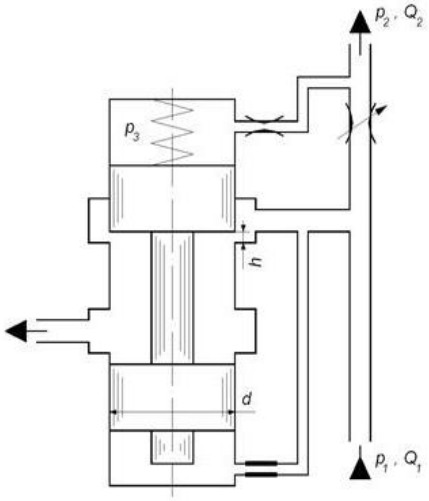


Рис. 2. Схема трехлинейного регулятора расхода

Массовый расход жидкости через дроссельный кран определяется зависимостью:

$$m_{dp} = \mu_{dp} F_{dp}(\varphi) \sqrt{2\rho(P_{\text{А}} - P_{\text{вых}})} \quad (1)$$

При фиксированной настройке дроссельного крана $(\mu_{dp} = \text{const},\ F_{dp}(\varphi) = \text{const})$ расход жидкости определяется лишь разностью давлений $P_{\text{А}} - P_{\text{вых}}$. Если данная разность остается постоянной, то и объем жидкости, проходящий через систему, остается неизменным. Это позволяет регулятору компенсировать влияние как внешних, так и внутренних факторов, оказывающих воздействие на расход жидкости.

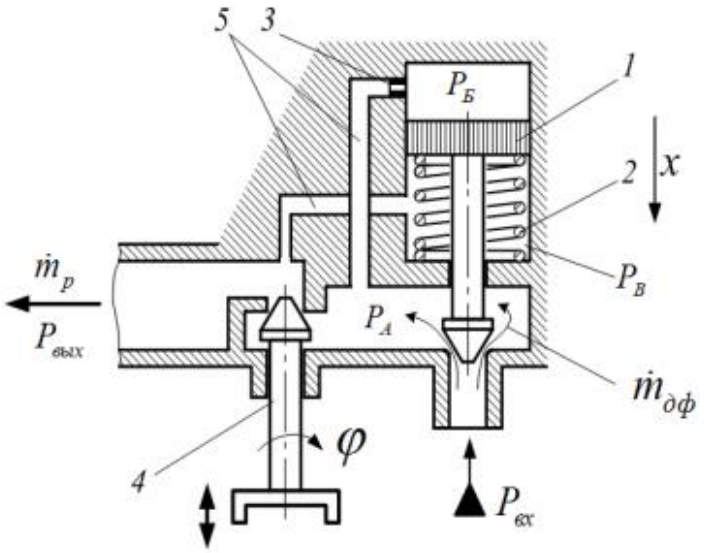


Рис. 3. Принципиальная схема гидромеханического регулятора расхода прямого действия: *1* – дифференциальный клапан; *2* – пружина; *3* – жиклёр; *4* – дроссельный кран; *5* – каналы подвода давлений к дифференциальному клапану

Для регулирования работы изменяется площадь проходного сечения $F_{dp}(\varphi)$ дроссельного крана с помощью электропривода. В случае изменения перепада давления на дроссельном кране ($P_A - P_{вых}$) происходит соответствующее изменение расхода горючего. Информация о колебаниях перепада давления поступает через обратные каналы *5* и жиклёр *3* на чувствительный элемент (поршень дифференциального клапана), что приводит к нарушению равновесия сил, действующих на него. В результате поршень перемещается для восстановления перепада давления ($P_A - P_{вых}$) и, следовательно, расхода горючего. Например, увеличение перепада давления $P_A - P_{вых}$ приводит к уменьшению площади проходного сечения дифференциального клапана с целью компенсации возникшего изменения, т. е. к снижению расхода жидкости. Регулировка дифференциального клапана осуществляется с помощью пружины *2* для поддержания заданного перепада давления. Так как регулятор работает по принципу прямого действия, функции чувствительного элемента и исполнительного механизма объединены в одном узле (дифференциальном клапане *3*).

Регуляторы расхода находят применение в различных сферах (рис. 4):

1. Трубопроводы. Они позволяют управлять объемами рабочего вещества, стабилизируя давление и предотвращая механические повреждения, утечки и деформацию труб. Регуляторы расхода используются в системах водоснабжения жилищно-коммунального сектора, административных зданиях и на производственных объектах, а также в системах пожаротушения, насосных установках, орошении и мелиорации.

2. Объемные гидроприводы. Например, регулятор расхода, установленный в сливной гидролинии, поддерживает постоянный уровень слива из гидродвигателя, что обеспечивает стабильную скорость движения рабочих органов.

3. Промышленность. В этой сфере регуляторы расхода газа используются для контроля расхода газа в системах отопления, приводах, компрессорах, котлах и других приложениях, где важен точный мониторинг и управление потоком газа.

Проведён анализ различных схем регулятора расхода. С учетом развития малогабаритной техники или техники с дистанционным управлением данный вид гидроагрегата с дистанционным управлением позволит управлять скоростью возвратно-поступательного движения или скоростью гидродвигателя рабочего органа на расстоянии. Что позволит оператору находиться не в зоне риска или контролировать рабочий орган непосредственно вблизи агрегата. За счёт этого повышается безопасность оператора или точность проведённых робот.

Описан принцип работы гидромеханического регулятора расхода. И представлены сферы применения данного вида агрегата.



Рис. 4. Области применения регулятора расхода

Библиографический список

1. Вильнер, Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам // Издательство: Минск. Высшая школа, 1976 г. – 96 с.

2. Дунаев, П.Ф., Леликов, О.П. Детали машин. Курсовое проектирование // Издательство: М. Высшая школа, 1985 г. – 336 с.

3. Кондаков, Л.А., Прокофьев, В.Н. Машиностроительный гидропривод // Издательство: М. «Машиностроение», 1978 г. – 495 с.

4. Орлов, Ю.М. Авиационные объёмные гидромашины с золотниковым распределением // Издательство: Пермский государственный технический университет, 1993 г.

5. Расчет статической и динамической нагрузки на привод [Электронный ресурс]: https://studbooks.net/2360263/tehnika/raschet_staticheskoy_dinamicheskoy_nagruzki_proektiruemyy_privod (дата обращения 01.04.2023).

© Мамыкин О.П., Садыков Т.Х., 2024

УДК 62-133.2

Р.Г. МАНУКЯН
mavrokia@yandex.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доцент Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ УСТАНОВОК РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация: приведен анализ установок разведочного бурения российского производства по конструктивным особенностям.
Ключевые слова: установки разведочного бурения; конструктивные особенности; мачта буровой установки; вращатель.

Исследование грунта необходимо на этапе закладывания фундамента при строительстве зданий, сооружений, дорог для исключения риска деформации грунта при выполнении объектов. Для проведения геологоразведочных работ требуется специализированная техника – установка разведочного бурения.

Буровая установка предназначена для бурения геофизических и структурно-поисковых скважин на нефть и газ, разведки месторождений твердых полезных ископаемых, строительных материалов и подземных вод, инженерно-геологических изысканий, бурения водозаборных и взрывных скважин.

Для выявления особенностей имеющихся на рынке установок проведен анализ установок разведочного бурения на основе информации заводов изготовителей: «Московского опытного конструкторского завода буровой техники» (в дальнейшем МОЗБТ); «Объединённого завода буровой техники им. Воровского» (в дальнейшем ОЗБТ); «Уфимского завода геологоразведочного оборудования»; завода «Бурагрегат»; «Геомаш»; «Техно-СБТ».

В ходе анализа составлена табл. 1 по конструктивным особенностям установок разведочного бурения вышеперечисленных производителей. Особенности конкретных установок выделены в таблице.

Возможность расположить установку на шасси колесного, гусеничного типа могут предложить все производители.

Мачта буровой установки один из важнейших элементов конструкции, на который приходится наибольшая нагрузка при эксплуатации установки. В процессе бурения гидроцилиндр, расположенный в мачте, давит на буровой инструмент.

Таблица 1

Различия установок разведочного бурения по конструктивным особенностям

Модель	Габариты в транспортном положении, мм	Тип шасси	Тип мачты	Механизм для спуска, подъема, подачи инструмента	Тип вращателя
1	2	3	4	5	6
МОЗБТ					
УРБ2А2	7850х2500х х3300 на базе ЗиЛ-131 (8080х2500х х3500) Урал	Колесное гусеничное	Сварная с гидравли-ческими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный
УРБ2А-М6	5480х2220х х2300	Гусеничное	Сплошная, повышен-ной жесткости, прямоуголь-ного сечения	Домкрат гидравлический с цепной системой	Подвижный, двухскорост-ной, с гидравличес-ким переключени-ем
УРБ2а-2М	7850х2500х х3300 на базе ЗиЛ-131 (8080х2500х х3500) Урал	Колесное, гусеничное	Сварная с поворот-ным механиз-мом	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный
УРБ2-Д3	7850х2500х х3300 на базе ЗиЛ-131 (8080х2500х х3500) Урал	КАМАЗ, УРАЛ, Маршевый / Палубный 155	Сварная с гидравли-ческими опорными домкрата-ми	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Гидравличес-кий, подвижный
УРБ-4Т	____	Гусеничный трактор типа ТТ-4,ТТ-4М, МСН-10, ТЛ-5АЛМ-01	Сварная с гидравли-ческими опорными домкрата-ми	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
УРБ от завода буровой техники имени В.В. Воровского					
УРБ2-А2	8330х2500х х3980	Колесная, Урал-4320 Урал-44202-5351-74 (Next) или ЗИЛ-131	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный
УРБ-2Д3	8330х2500х х3980	Колесная	Фермовая конструкция	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный
УРБ-2НТ	6980х2500х х3000	Гусеничная	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный
УРБ-2А-2Д	8080х2500х х3500	«Урал 6х6», «КАМАЗ 6х6» либо «ЗИЛа-131»	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный
УРБ-4Т	8330х2500х х3980	Гусеничное	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный
УРБ2-А2	8330х2500х х3980	Колесная, Урал-4320 Урал-44202-5351-74 (Next) или ЗИЛ-131	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Уфимский завод геологоразведочного оборудования					
УРБ2-А2	7850х2500х3300 7900х3150х3100 снегоходная 10430х3000х3590 на санном ходу	ЗиЛ-131(Урал), ГТ-Тр	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой (может изготавливаться мачта для наклонного бурения)	Подвижный
УРБ-2А-2Д	7850х2500х3300	КамАЗ-43114, Урал-4320	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой (может изготавливаться мачта для наклонного бурения)	Подвижный
УРБ-2Д3	8330х2480х3650	Урал 4320 и КамАЗ 43114.	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой (может изготавливаться мачта для наклонного бурения)	Подвижный
УРБ-2А-2ГТ	7850х2750х3900	ТЛ-5АЛМ, ТСН4	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Подвижный
Завод Бурагрегат					
УРБ2А2	____	Шасси КаМАЗ, «Урал», ЗиЛ, а также на вездеходные шасси	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Гидравлический подвижный

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6
УРБ2Д3	ЗиЛ 7850х2500х3300 УРАЛ 8080х2500х3500 КАМАЗ 8700х2500х3680	ЗИЛ, Урал, КамАЗ	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Гидравлический подвижный
УРБ-51	____	Колесная	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Гидравлический подвижный
Геомаш					
УРБ-210	____	КАМАЗ-43118	Вертикальная, фермерной конструкции	Гидроцилиндр с полиспастной системой подачи	Подвижный с обратной промывкой
Техно-СБТ					
УРБ-2А2	7850х2500х3300 8080х2500х3500 8700х2500х3680	ЗИЛ, Урал, КАМАЗ	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Гидравлический подвижный
УРБ-2Д3	7850х2500х3300 8080х2500х3500 8700х2500х3680	ЗИЛ, Урал, КАМАЗ	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Гидравлический подвижный
УРБ-74 мини	7850х2500х3300 8080х2500х3500 8700х2500х3680	ГАЗ-66, МТЛБ	Сварная с гидравлическими опорными домкратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Гидравлический подвижный
УРБ-74	7850х2500х3300 8080х2500х3500 8700х2500х3680	УРАЛ, КАМАЗ, МТЛБ, ТТ-4	Сварная с гидравлическими опорны-ми дом-кратами	Домкрат гидравлический с полиспастной системой	Гидравлический подвижный

Стандартным исполнением мачты является сварная с гидравлическими опорными домкратами. Из нестандартных можно выделить сплошную мачту с повышенной жесткостью, прямоугольного сечения УРБ2А-М6 и сварную с поворотным механизмом УРБ2А-2М от «МОЗБТ», мачты фермовой конструкции УРБ-2Д3 от «ОЗБТ им. В.В. Воровского» и УРБ-210 от «Геомаш».

Механизм для спуска, подъема и подачи инструмента, расположенный в мачте, отличается от стандартных у «Геомаш». Компания разработала механизм, в котором заменила телескопический гидроцилиндр с тросовой системой на гидроцилиндр с цепной системой.

Анализ конструкций установок разведочного бурения показал, что в основном они похожи. Ключевые элементы, такие как мачта, вращатель и механизм подъема / опускания, редко имеют различие в исполнении.

Библиографический список

1. Компания «Сервис Гео»: официальный сайт – URL: https://srvgeo.ru/about-us (дата обращения 19.10.2023).
2. Аванесов, В.С., Александров, А.Б., Балаба, В.И. и др. Аварии и несчастные случаи в нефтяной и газовой промышленности России. – М.: АНО «Технонефтегаз», 2001. – 213 с.
3. Компания «Объединенный завод буровой техники имени В.В. Воровского»: официальный сайт – URL: https://zivv.ru/poleznaya-informaciya/articles/naznachenie_razvedochnih_skvagin_i_sposobi_bureniya (дата обращения 16.10.2023).
4. Компания «Техно-СБТ»: официальный сайт – URL: https://texno-sbt.com (дата обращения 17.10.2023).
5. Компания «Уфимский завод геологоразведочного оборудования» официальный сайт – URL: https://uzgo-urb.ru/about/ (дата обращения 17.10.2023).
6. Компания АО «Московский опытный завод буровой техники» официальный сайт – URL: https://www.mozbt.com (дата обращения 17.10.2023).
7. Компания «Геомаш» официальный сайт – URL: https://www.geomash.ru (дата обращения 17.10.2023).
8. Завод «Бурагрегат» официальный сайт – URL: https://бурагрегат.рф/katalog/tyazhelaya-tehnika/urb-2a2 (дата обращения 17.10.2023).

© Манукян Р.Г., 2024

УДК 62-8

Н.А. МАРКОВ, А.Р. МУРЗАГУЛОВА
nikita-markov-2003@yandex.ru, *adelina.m2003@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

АВТОНОМНЫЙ РУЛЕВОЙ ПРИВОД САМОЛЕТА

Аннотация: в данной статье рассмотрена схема автономного рулевого привода самолёта с замкнутой системой циркуляции рабочей жидкости, её описание и метод работы, а также характеристики насосной станции.
Ключевые слова: АРП; самолет; система управления; способ работы; схема; рулевая плоскость; аварийный режим; штатный режим.

Автономный рулевой привод (АРП) самолета – это система, которая позволяет управлять рулевыми поверхностями самолета (элеронами, рулем высоты и рулем направления). АРП включает в себя: рулевой привод; клапан переключения систем; управляющий клапан переключения гидросистем; клапан развязки гидросистем; клапан подпитки; предохранительный клапан.

История его развития начинается еще в 1910-х годах, но даже сегодня человек не смог полностью усовершенствовать АРП самолета (рис. 1).

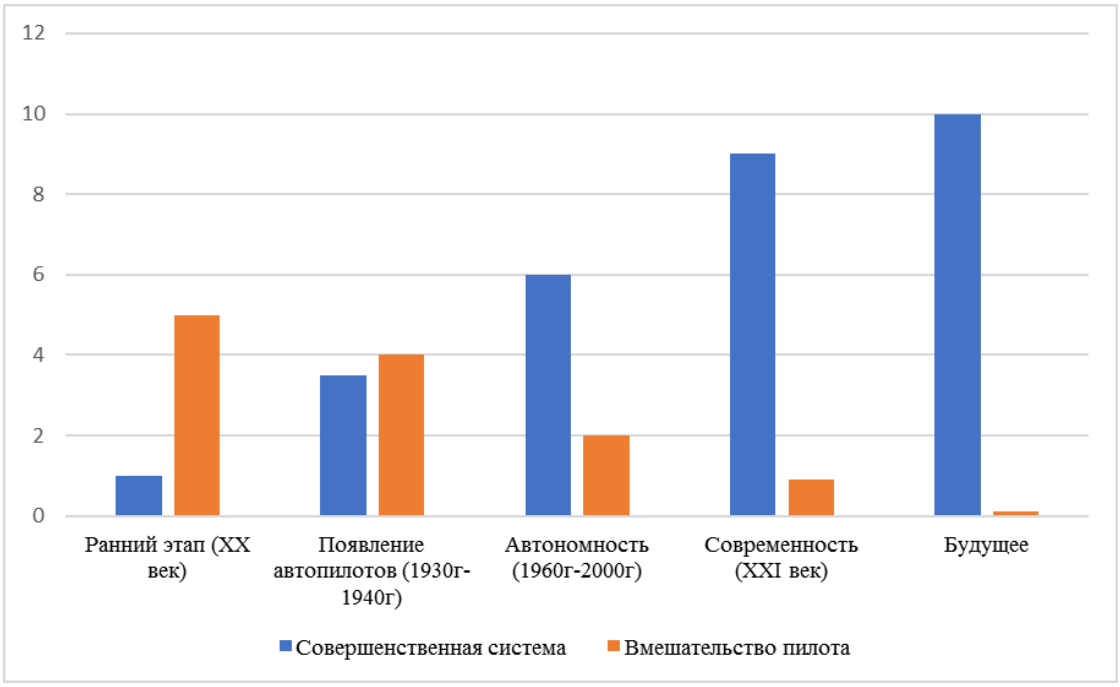


Рис. 1. Развитие АРП

Ранний этап 1910–1920 года: первые попытки автоматизирования РП самолета были связаны с использованием гироскопов. Их называли гироскопическими автопилотами (рис. 1). Использовали вращающиеся

маховики для поддержания устойчивости курса, но точность и надежность были ограничены и требовали постоянного вмешательства человека.

Появление автопилотов 1930–1950 года: развитие авиации требовало более совершенных систем управления. Автопилоты с более сложным функционалом, способные удерживать курс, управлять высотой, скоростью – необходимость для безопасного и комфортного полета.

Автономность, 1960–2000 года: внедрение компьютеров; развитие микропроцессорной техники; появление GPS. Все это позволило создать не только сложные интеллектуальные автопилоты, но и создать самостоятельный, анализирующий автопилот, что привело к эффективности полета.

Современность, XXI век: АРП самолета – комплексная технология, включающая в себя много факторов. Это: удержание курса; планирование; навигация; избегание столкновений. Эти факторы позволяют снизить риски ошибок человека, повысить эффективность и безопасность перелетов.

На рис. 2 приведена схема гидравлическая принципиальная АРП самолёта (рис. 3) с замкнутой системой циркуляции и клапаном переключения рабочей жидкости.

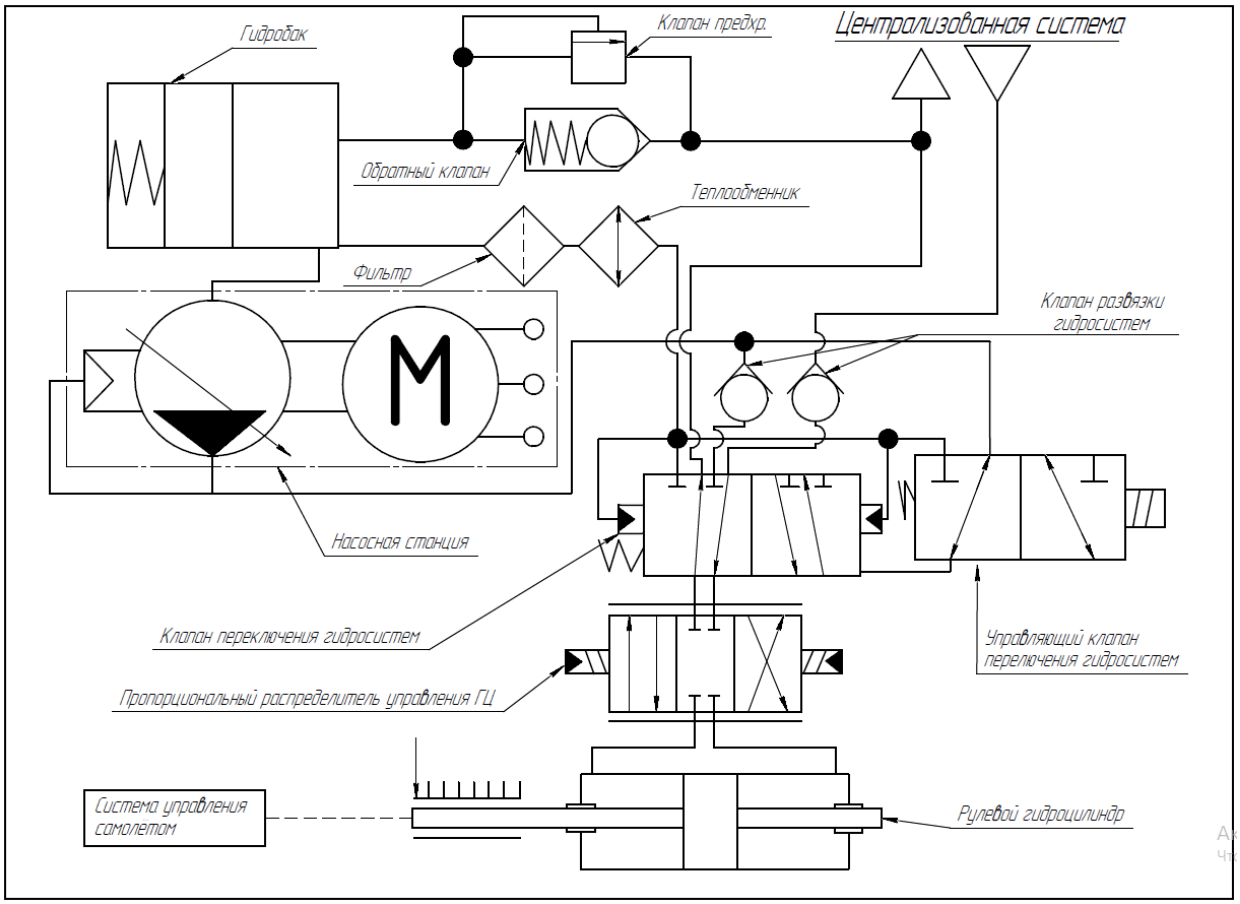


Рис. 2. Схема гидравлическая принципиальная



Рис. 3. Автономный рулевой привод самолёта

Гидравлическая схема (см. рис. 2) состоит из электрогидравлического усилителя мощности рулевого привода (ЭГУ). В качестве ЭГУ был выбран двухкаскадный распределитель с электрогидравлическим управлением и клапаном переключения гидросистем.

Локальная гидросистема, состоящая из клапана подпитки, предохранительного клапана, подключена к управляющему клапану переключения гидросистемы. В свою очередь к централизованной системе подключена локальная гидросистема, и клапан развязки гидросистем это обратный клапан, который пропускает жидкость только в одном направлении.

Автономный электрогидравлический рулевой привод содержит: электродвигатель постоянного тока, соединенный с блоком управления; гидравлический бак со снабжённым клапаном реверса в виде четырехлинейного трехпозиционного электрогидравлического распределителя с пружинным центрированием. Каждая из двух управляющих обмоток соединена с выходом одного из компараторов, на вход которых подается управляющий сигнал, поступающий также на вход двухполупериодного выпрямителя.

Примечание: в случае отсутствия сигналов управления в обмотках клапана реверса линии нагнетания и слива соединяются между собой.

Способ работы

АРП работает в двух режимах: первый режим штатный; второй аварийный. В штатном режиме клапан переключения систем связывает полости гидроцилиндра с централизованной системой самолёта. При управляющем сигнале из кабины пилота (от ручки управления самолётом, далее РУС) пропорциональный распределитель управления ГЦ направляет высокое давление от централизованной системы в ту или иную полость гидроцилиндра, после чего под действием перепада давления поршень гидроцилиндра, механически связанный с рулевой плоскостью, перемещается, и тем самым изменяется положение самолёта по одной из трёх осей.

В случае, если по какой-то причине централизованная система не создаёт давление, АРП по сигналу переключается в аварийный: управляющий клапан

переключения гидросистем соединяет золотниковую полость клапана переключения гидросистем с нагнетательной линией насосной станции. При этом включается встроенная в АРП насосная станция, которая создаёт давление в линии нагнетания, и тем самым золотник клапана переключения гидросистем перемещается влево и соединяет полости гидроцилиндра с резервной гидросистемой. В результате гидроцилиндр работает от своей собственной гидросистемы, включающей насосную станцию, гидробак, обратные и предохранительные клапаны, за счёт чего обеспечивается высокая надёжность и дублирование рулевого привода.

Характеристика насоса – зависимость основных технических показателей: от подачи и от давления при постоянных значениях частоты вращения рабочих органов, вязкости и плотности жидкости на входе в насос. Рабочая часть характеристики – зона характеристики насоса, в пределах которой рекомендуется его эксплуатация.

Характеристику насоса строят по формуле:

$$P_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{ном}}(Q_{\text{Н}} \cdot e - Q)}{Q_t \cdot (1 - \eta)},$$

где e – коэффициент изменения подачи насоса; Q_t – теоретическая подача насоса; $P_{\text{ном}}$ – номинальное давление в системе.

Располагаемая характеристика насосной станции приведена на рис. 4.

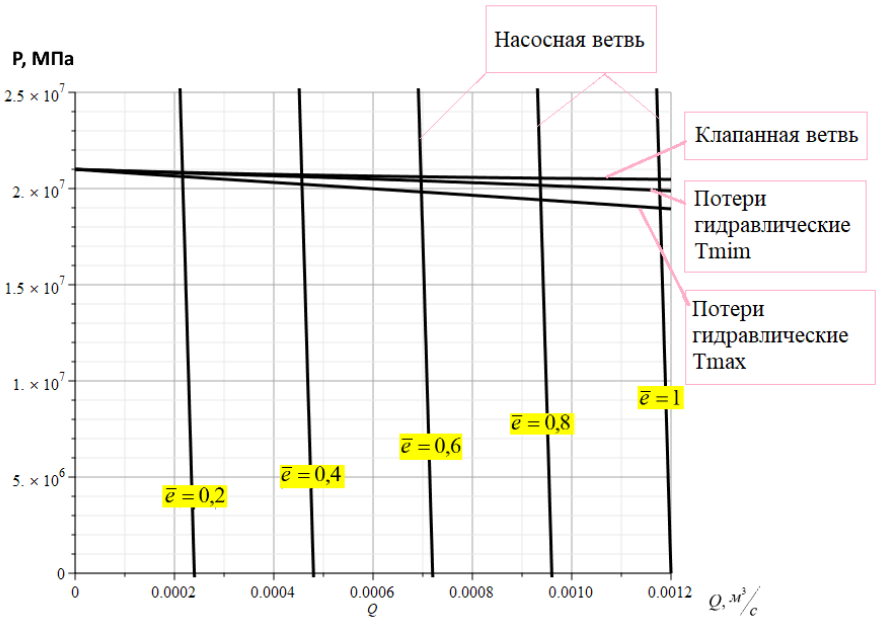


Рис. 4. Располагаемая характеристика насоса

Характеристики представлены для следующих степеней регулирования производительности насоса с учётом объёмного КПД (где «*e*» % от максимальной производительности): *e* = 20%; *e* = 40%; *e* = 60%; *e* = 85%; *e* = 100%). Мощности приводного двигателя достаточно для реализации текущих скоростей и нагрузок. Система готова к эксплуатации.

Сплошные наклонные линии показывают максимальную производительность при определённом рабочем объёме насоса.

Внешние и внутренние статические характеристики

Внешняя статическая характеристика выдвижения штока гидроцилиндра подъема и опускания рабочего органа 40 кН приведена на рис. 5.

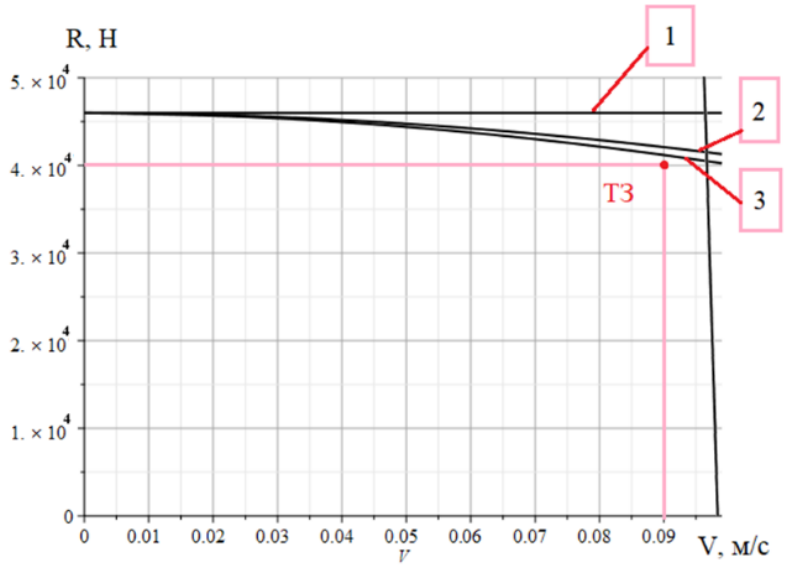


Рис. 5. Характеристика гидроцилиндра: *1* – зависимость нагрузки, при достижении которой в системе поднимается давление, на которое настроен предохранительный клапан; *2* – зависимость скорости штока гидроцилиндра от суммарных потерь в гидросистеме при температуре рабочей жидкости равной соответственно 135°С; *3* – зависимость скорости штока гидроцилиндра от суммарных потерь в гидросистеме при температуре рабочей жидкости соответственно – 20°С

Результаты расчёта подтверждают возможность реализации заданных скоростей и нагрузок. Условия технического задания выполняются. Скорость выдвижения штока ГЦ рабочего органа регулируется подачей насоса.

Таким образом, развитие автономных рулевых приводов самолетов неизбежный процесс. Эта технология изменит авиацию, сделав ее более безопасной и эффективной, а самое главное доступной. Сегодня многие современные самолеты оснащены автономными системами управления, которые позволяют автоматизировать многие процессы полета. Однако, необходимо решать проблемы, связанные с регулированием.

Библиографический список

1. Ермаков, С.А. Автономный электрогидравлический привод с цифровым регулятором // Приводная техника. 1997. № 3. С. 17–19.

2. Управление РВ самолёта Суперджет [Электронный ресурс] // URL: https://studopedia.su/18_23745_upravlenie-rv-samoleta-superdzhet.html.

3. Шероховатость стенок трубопровода: типы и влияние [Электронный ресурс] // URL: https://www.nektonnasos.ru/article/gidravlika/sherohovatoststenok/.
4. Шумилов, И.С. Системы управления рулями самолётов: учебное пособие. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 425–460.

© Мурзагулова А.Р., Марков Н.А., 2024

УДК 62-822

Н.А. МАРКОВ, А.Р. МУРЗАГУЛОВА
nikita-markov-2003@yandex.ru, *adelina.m2003@mail.ru*
Науч. руководит. – канд. техн. наук, доцент П.В. ПЕТРОВ

Уфимский Университет науки и технологий

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГУСЕНИЧНОГО АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКА

Аннотация: в статье рассматривается гидравлическая система управления рабочими органами и привода хода гусеничного асфальтоукладчика. Для исследования и оптимизации работы гидропривода была построена динамическая модель контура подъема и опускания боковин бункера.
Ключевые слова: гидравлическая система; асфальтоукладчик; гусеничный асфальтоукладчик; гидропривод; привод гусениц; динамическая модель.

Развивающийся процесс автомобилизации в нашей стране, рост объемов перевозок и их дальности, повышение скоростей движения требуют совершенствования конструкций дорожно-строительной техники.

Исследование направлено на изучение возможностей модернизации гидравлической системы гусеничного асфальтоукладчика с целью повышения его эффективности и точности управления.

Объект исследования

Объектом исследования является гидравлическая система гусеничного асфальтоукладчика. За прототип была выбрана гидравлическая система гусеничного асфальтоукладчика АСФ-Г-3-01.

Недостатками гидравлической системы асфальтоукладчика АСФ-Г-3-01 являются:

– установлены нерегулируемые насосы, что приводит к потерям мощности и нагреву рабочей жидкости;

– отсутствует регулировка по скорости конвейеров питателя и распределительного шнека;

– трамбующий брус работает с постоянной скоростью;

– механический привод гусеничного хода.

Модернизированная гидравлическая схема представлена на (рис. 1, 2).

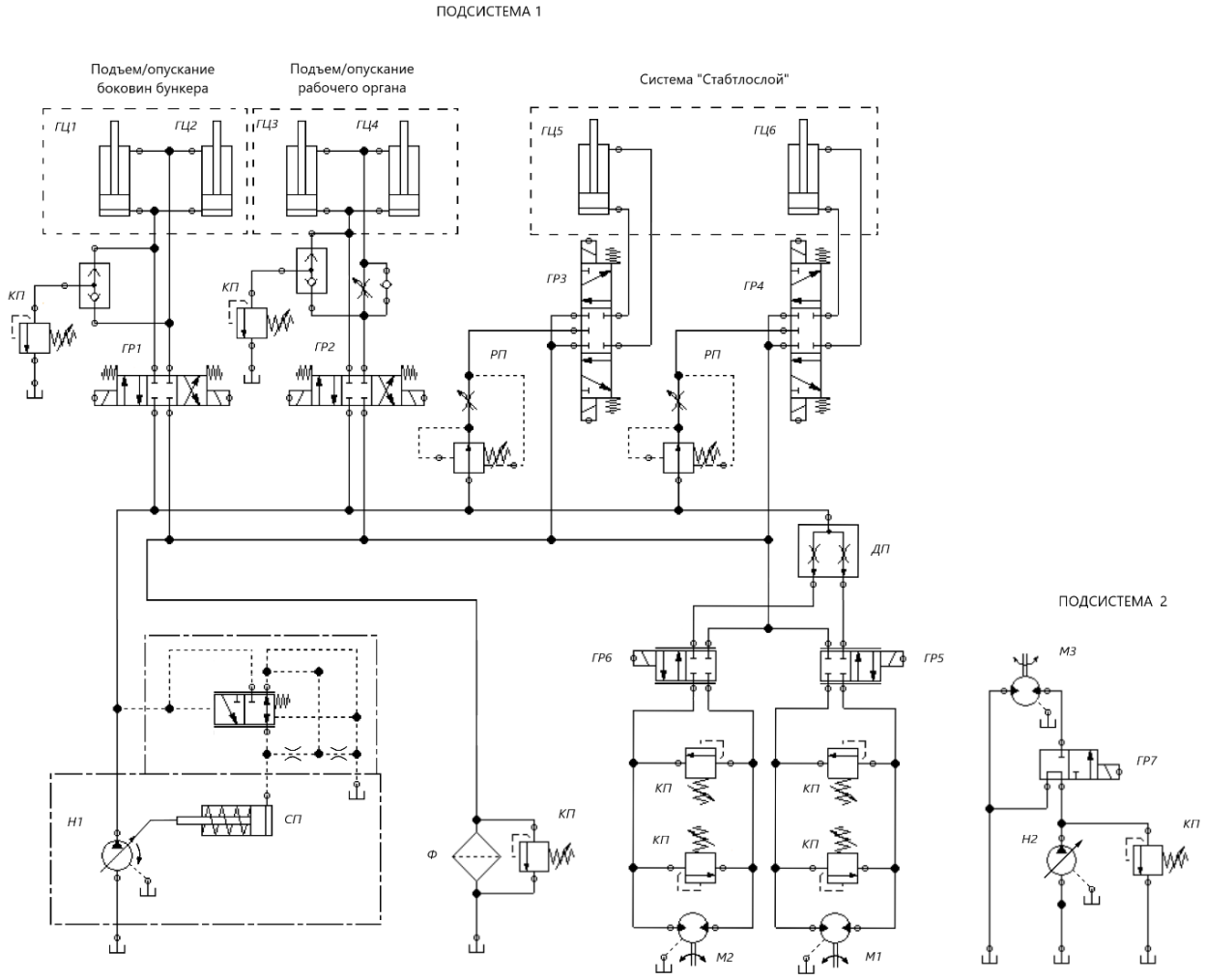


Рис. 1. Гидросистема управления рабочих органов асфальтоукладчика: *Н1*, *Н2* – аксиально-плунжерные насосы; *ГР1*, *ГР2*, *ГР3*, *ГР4*, *ГР5*, *ГР6*, *ГР7* – гидрораспределители; *ГЦ1*, *ГЦ2* – гидроцилиндры подъема и опускания боковин бункера; *ГЦ3*, *ГЦ4* – гидроцилиндры подъема и опускания рабочего органа; *ГЦ5*, *ГЦ6* – гидроцилиндры системы «стабилослой»; *М1* – гидромотор конвейера; *М2* – гидромотор распределительного шнека; *М3* – гидромотор трамбующего бруса; *КП* – клапан предохранительный; *Ф* – фильтр

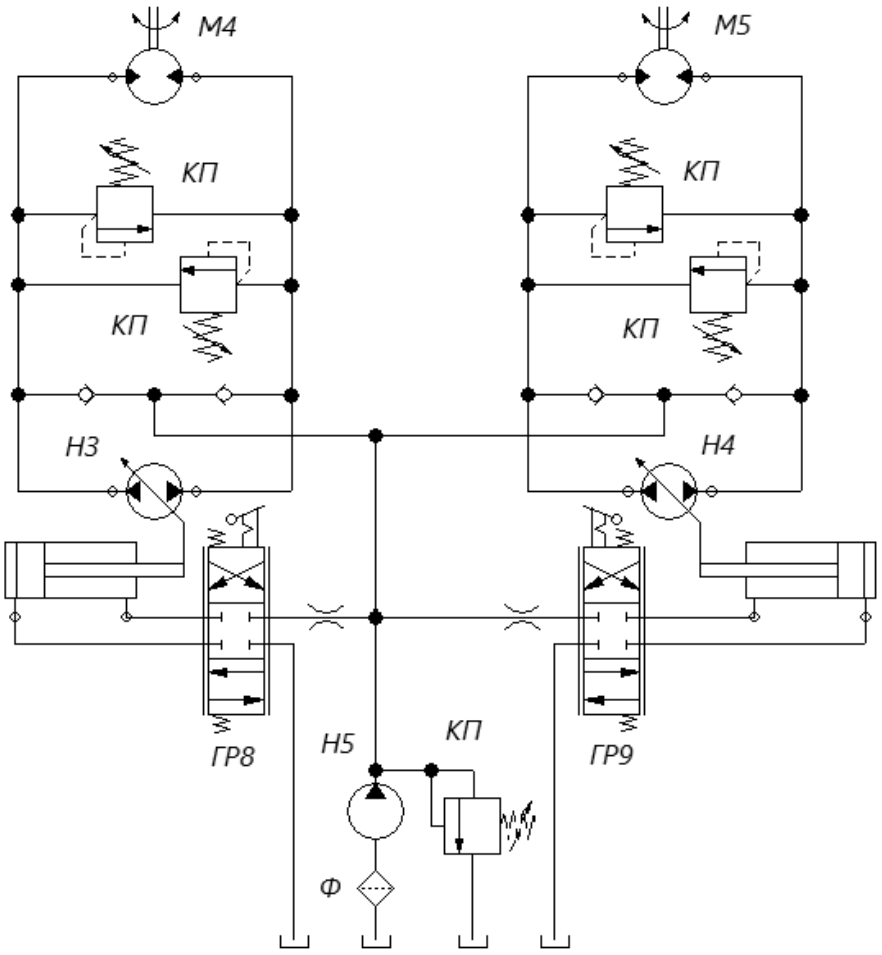


Рис. 2. Гидросистема гусеничного хода: *Н3*, *Н4* – реверсивные аксиально плунжерные насосы привода гусениц; *Н5* – шестеренный насос подпитки; *М4*, *М5* – гидромоторы привода гусениц; *ГР8*, *ГР9* – гидрораспределители сервопоршней; *КП* – клапан предохранительный; *Ф* – фильтр

Регулируемый аксиально-плунжерный насос предотвратит нагрев рабочей жидкости. Механический привод конвейера и распределительного шнека прототипа не позволяет обеспечивать точное и равномерное распределение материала без излишних потерь, замена его на гидравлический привод поспособствует ускорить процесс укладки асфальтобетонной смеси. Изменение скорости работы трамбующего бруса позволит адаптировать процесс уплотнения асфальта под различные условия дорожных работ.

Существует несколько причин, по которым целесообразно заменить механический привод гусеничного хода на гидравлический:

1. Плавность изменения передаточного соотношения в широком диапазоне, что позволяет с большей эффективностью использовать крутящий момент.

2. Возможность работать на небольших скоростях, что особенно актуально для сельскохозяйственной и строительной техники.

3. Гидравлический привод обладает повышенным быстродействием.

Динамическая модель подъема боковин бункера

Для исследования системы и оптимизации эксплуатационных режимов гидропривода построена динамическая модель контура подъема / опускания боковин бункера.

Рассматриваемая принципиальная схема представляет собой контур подъема и опуская боковин бункера. Расчетная схема (рис. 3), включает в себя аксиально-поршневой насос, гидравлический многопозиционный трёхлинейный распределитель с гидравлическим и пружинно-возвратным управлением, дроссель, гидроцилиндр отклонения наклонной шайбы насоса и гидроцилиндр поднятия боковин бункера.

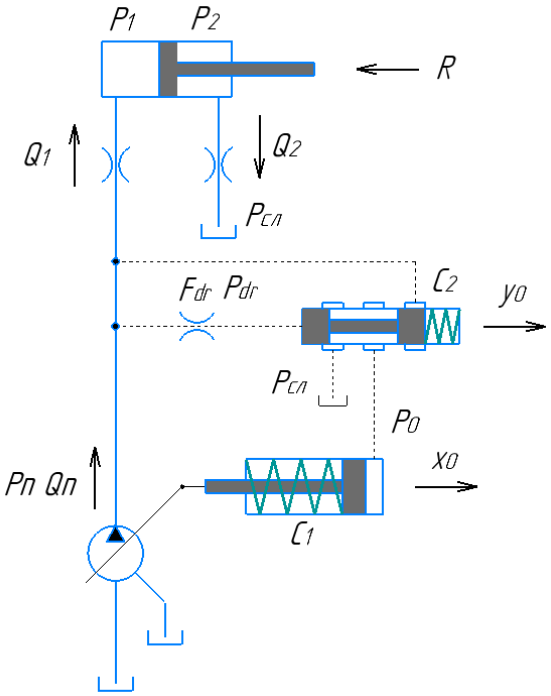


Рис. 3. Расчетная схема контура подъема / опускания боковин бункера

Для математического описания гидропривода принимаются допущения:

1. Переходные процессы происходят в среднем положении поршня гидроцилиндра.
2. Трение в ГЦ не оказывает влияния.
3. Модуль объемной упругости рабочей жидкости, коэффициент ее вязкости, коэффициент расхода управляемого гидрораспределителя, а также давление слива являются постоянными величинами.
4. Температура жидкости в течение рассматриваемого динамического процесса не изменяется.
5. Гидравлические потери в подводящих магистралях гидродвигателя малы, и ими можно пренебречь.
6. Кинематическая система жёсткая.

Математическая модель примет следующий вид.

Уравнение движения гидроцилиндра:

$$m_p \frac{d^2}{dt^2} z_0(t) = P_n(t) A_{p1} - P_{sl}(t) A_{p2} - k_{v1} \frac{d}{dt} z_0(t) - R_p - \Delta R$$

Уравнение для определения давления питания:

$$\frac{d}{dt} P_n(t) = \frac{E}{V} \left(\frac{Q_n \times (\gamma - x_0(t))}{\gamma} - \mu \times F_{dr} \times \sqrt{\frac{2 \times |P_n(t) - P_u(t)|}{\rho}} - A_{p2} \frac{d}{dt} z_0(t) \right.$$

Уравнение движения золотника:

$$m_z \frac{d^2}{dt^2} y_0(t) = P_n(t) A_z - y_0(t) C_2 - k_{v2} \frac{d}{dt} y_0(t)$$

Уравнение движения сервопоршня:

$$m_{sp} \frac{d^2}{dt^2} x_0(t) = P_u(t) A_{sp} - (x_0(t) + x_n) C_1 - k_{v3} \frac{d}{dt} x_0(t)$$

Уравнение для определения давления на входе в сервопоршень:

$$\frac{d}{dt} P_г(t) = \frac{E}{V} \left(\mu \times b \times (y_0(t) + \frac{A_z \times P_u(t)}{C_2} \right) \times$$

$$\times \sqrt{\frac{2 \times |P_n(t) - P_u(t)|}{\rho}} - A_{sp} \frac{d}{dt} x_0(t)$$

На рис. 4, 5 представлены графики численного моделирования рабочего процесса, анализ которых показал, что время выхода на режим (скорость перемещения штока гидроцилиндра 0,02 м/с) составляет 0,2 с, ошибка регулирования составляет менее 10%.

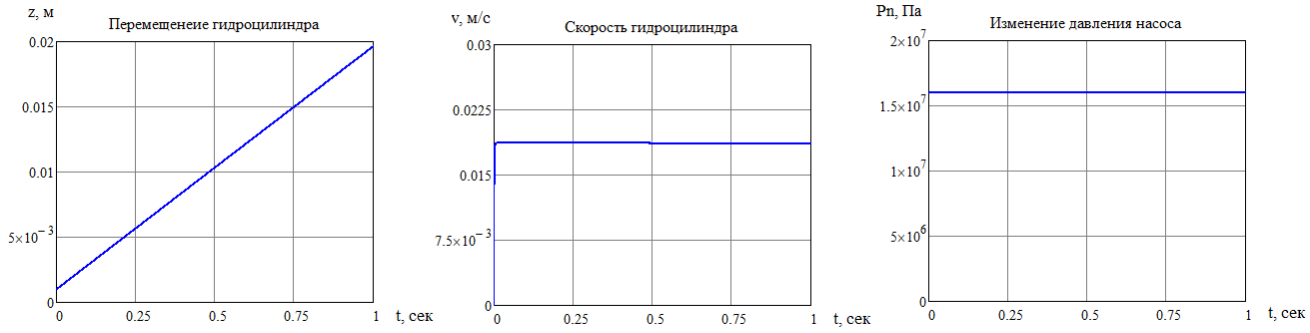


Рис. 4. Динамические характеристики гидроцилиндра подъема / опускания боковин бункера

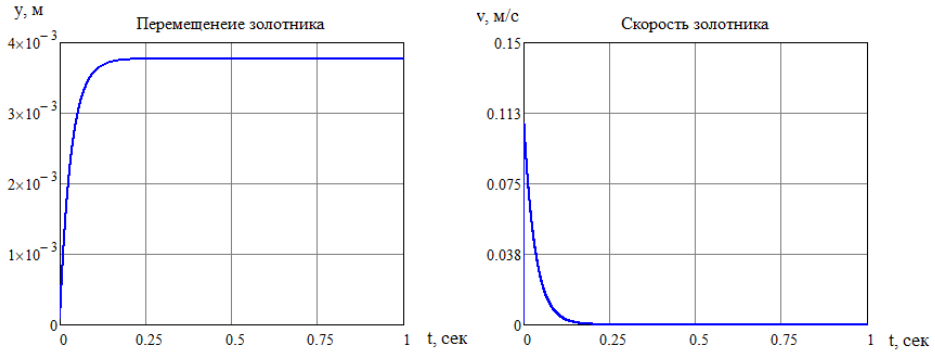


Рис. 5. Динамические характеристики золотника управления сервопоршня

Модернизирована гидравлическая система управления рабочих органов асфальтоукладчика.

Разработана гидравлическая схема привода гусеничного хода асфальтоукладчика.

Составлена расчетная схема для динамического моделирования контура подъема и опуская боковин бункера. Проанализировав графики переходного процесса, время выхода на режим составляет 0,2 секунды, ошибка регулирования менее 10%.

Математическое моделирование на основе фундаментальных уравнений сохранения и машинная имитация позволяют получить максимум информации о динамических свойствах системы и выбрать наиболее эффективные значения параметров системы.

Анализ структуры существующей системы, выявил ее основные недостатки, и разработка решений позволит оптимизировать процессы укладки асфальтобетонной смеси и сделать строительство дорожных покрытий более эффективным.

Библиографический список

1. Пособие по конструкции, теории, расчету основных узлов и эксплуатационных параметров асфальтоукладчиков [Электронный ресурс] // https://pnu.edu.ru/media/filer_public/2013/01/16/sdm_posobie.pdf.

2. Статистика качества дорожного покрытия [Электронный ресурс] // http://стат.гибдд.рф/.

3. Проектирование гусеничного шасси [Электронный ресурс] // https://studwood.net/2108634/tovarovedenie/raschyot_gidrosistemy.

4. Описание и принцип работы [Электронный ресурс] // https://stroy-technics.ru/article/asfaltoukladchiki.

© Марков Н.А., Мурзагулова А.Р., 2024

УДК 629.3.027.75

Д.А. МИНИГУЛОВА
dilaraminigulowa@yandex.ru
Науч. руководов. – доктор техн. наук, проф. В.А. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ГИДРОСИСТЕМА ШАГАЮЩЕГО КОЛЕСНОГО ЭКСКАВАТОРА

Аннотация: рассмотрены актуальность разработки гидропривода шагающего экскаватора *Menzi Muck M545x*, анализ существующих разработок в данной области, предложена схема гидропривода шагающей машины.
Ключевые слова: экскаватор-паук; гидропривод шагающего экскаватора; шагающий механизм.

Шагающие колесные экскаваторы представляют собой универсальное оборудование, идеально подходящее для работы в сложных и недоступных местах, а также на крутых склонах. Эти машины были специально созданы для эксплуатации на крутых наклонах и в сложных условиях, где использование традиционных колесных и гусеничных экскаваторов может быть небезопасным. Трудно поверить, что такая сложная техника может удерживаться на склонах гор и одновременно выполнять земляные работы, или находясь в бурлящей воде, выставить колеса в разные направления. Уникальная конструкция позволяет управлять каждой «лапкой» отдельно, а в некоторых случаях можно использовать стрелу для маневрирования [2].

Объект исследования

Объектом исследования является гидравлическая система шагающего экскаватор *Menzi Muck M545x* [3].

Машины классифицируются по следующим критериям:

1. По конструкции. Существуют два типа: колесные экскаваторы-пауки, которые обладают четырьмя колесами одинакового размера, и шагающие экскаваторы-пауки, у которых имеются два основных колеса и два вспомогательных со значительно меньшим диаметром по сравнению с основными.

2. По размерам. Машины также делятся на две категории: малогабаритные, вес которых начинается от 0,9 тонн, и крупногабаритные, где вес составляет от 7,2 тонн.

3. По наличию опор. По мере необходимости для повышения устойчивости вместо колес или дополняя их могут устанавливаться специальные грунтозацепы.

4. По типу выполняемых работ. Экскаваторы-пауки могут использоваться для выполнения задач в лесных, горных и городских условиях.

Критерии качества экскаваторов-пауков и анализ характеристик приведены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии качества экскаваторов-пауков и анализ характеристик

	Kaiser S1(Германия)	Menzi Muck M545x (Швейцария)	Euromach R85 Big Foot (Италия)	XCMG ET110 (Китай)
Сила разрыва, кН	**54**	**102**	**118**	**128,5**
Вес, т	**6,9**	**13,5**	**9,8**	**22**
Глубина копания, м	**4,6**	**До 10,2**	**5,7**	**5,4**
Скорость перемещения, км/ч	**7**	**15**	**10**	**4**
Мощность, кВт	**54**	**114**	**73**	**133**

Составлена статистика по процентному соотношению количества патентов, зарегистрированных в европейских странах в период с 2014 по 2024 годы:

1. Китай (*XCMG*) 41%.
2. Швейцария (*Menzi Muck*) 27%.
3. Германия (*Kaiser*) 24%.
4. Италия (*Batemag*) 8%.

Информация о регистрации патентов в России за тот же период (с 2014 по 2024 годы) представлена на рис. 1.

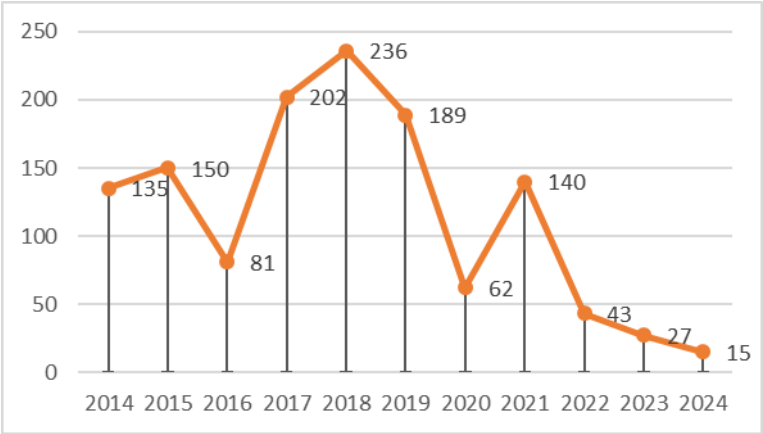


Рис. 2. Патенты о шагающих машинах в России

В 2018 году был зафиксирован рекордный уровень регистрации патентов, 236. В то время как 2024 год стал годом с наименьшим количеством патентов, зарегистрированных всего 15.

С учетом этих тенденций возникает необходимость в разработке гидропривода для шагающего колесного экскаватора.

Анализ проблем проектирования гидравлической системы:

1. Высокая себестоимость изделия. Использование российского и маломощного оборудования позволило снизить расходы на проектирование гидравлической системы машины.

2. Высокие требования к динамической устойчивости. В гидросистему добавлена обратная связь по давлению на гидроцилиндры. Как только экскаватор упрется «лапой» в землю, то давление поднимется.

3. Возможность совершать несколько манипуляций одновременно. Установлены запараллеленые гидроцилиндры.

4. Резкая остановка гидромоторов поворота кабины и поворота ковша. В этом случае в гидросистеме предусмотрены перепускные клапаны для сбрасывания давления, чтобы предотвратить разрыв трубопроводов [4].

Предложена модернизированная схема гидравлического привода шагающей машины (рис. 3).

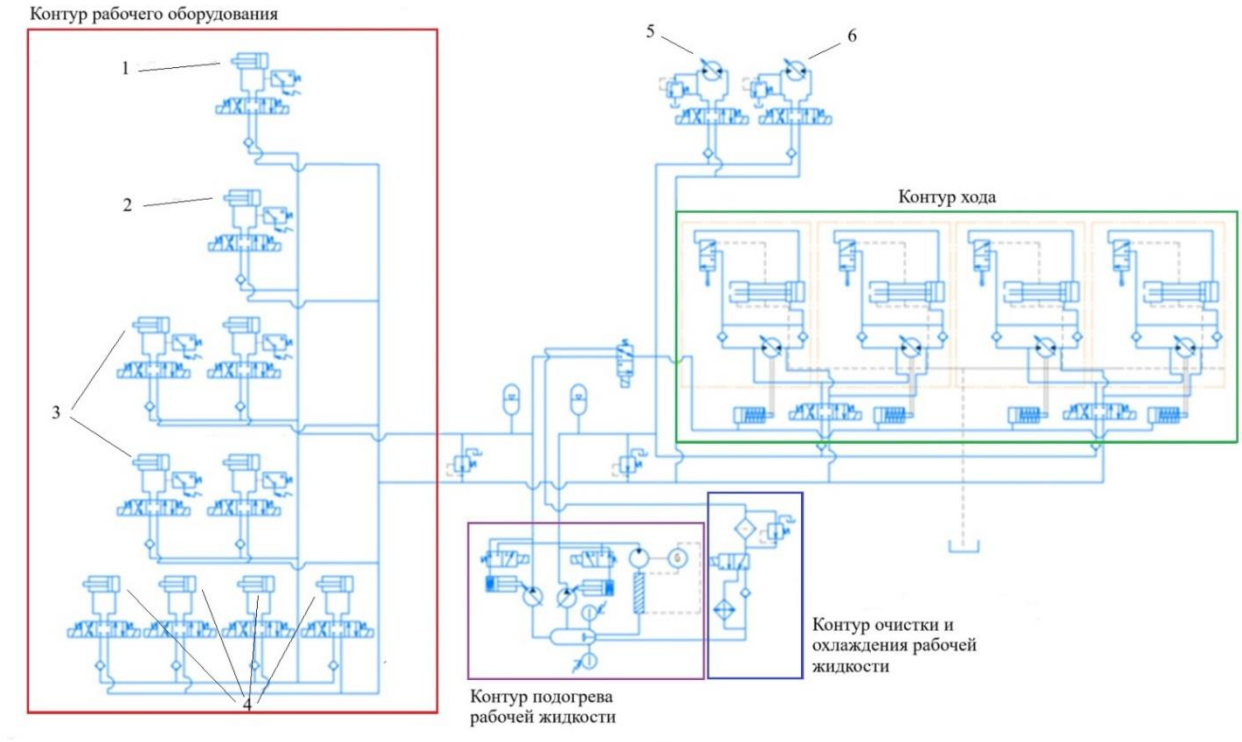


Рис. 3. Схема принципиальная гидравлическая шагающего колесного экскаватора: *1* – гидроцилиндр правой передней «лапы»; *2* – гидроцилиндр левой передней «лапы»; *3* – гидроцилиндры грунтозацепов; *4* – гидроцилиндры управления стрелой; *5* – гидромотор поворота кабины; *6* – гидромотор поворота ковша

Описание гидросистемы объекта

Ключевым преимуществом данного гидравлического привода является наличие двух независимых контуров, которые работают от двух насосов.

Принцип функционирования гидропривода следующий: два регулируемых насоса создают рабочее давление. В случае если температура рабочей жидкости соответствует норме, то насосы подают рабочую жидкость в основную гидросистему. Если же температура низкая, то жидкость циркулирует по короткому контуру до момента её достаточного прогрева.

Каждый насос питает отдельную гидравлическую систему: контур рабочего оборудования и контур хода (см. рис. 3). В контуре рабочего оборудования обеспечивается управление правой и левой передними «лапами», а также грунтозацепами и стрелой.

В контуре привода хода насос через распределители подает жидкость на четыре регулируемых гидромотора, которые создают крутящий момент, передавая его на колеса машины. Этот же насос обеспечивает работу гидромоторов, отвечающих соответственно за поворот ковша и поворот платформы.

В контуре хода установлены регулируемые гидромоторы: управление осуществляется путем изменения частоты вращения посредством регулятора. При подаче на него напряжения регулятор гидромотора изменяет рабочий объем гидромотора и, соответственно, момент и частоту вращения вала. При отсутствии напряжения гидромоторы выходят на максимальный рабочий объем, что соответствует максимальному моменту и минимальной частоте вращения.

Контур подогрева рабочей жидкости представляет собой сложную систему, в которой насосы через двухпозиционные гидрораспределители соединяются с гидромотором, механически связанным с валом электрогенератора. Один выход распределителей подключен к генератору, а другой к основному гидрораспределителю.

В гидробаке машины установлено температурное реле, которое управляет электромагнитом двухпозиционного гидрораспределителя. На этом этапе рабочая жидкость нагревается как за счет тепла, выделяемого нагревателем, так и теплоотдачи трубопроводов, до тех пор, пока она не достигнет температуры, установленной на температурном реле.

Как только эта температура достигается, реле замыкается, что приводит к смещению золотника в двухпозиционном гидрораспределителе, и перенаправляет рабочую жидкость во всасывающую линию. Уровень рабочей жидкости в баке отображается специальным указателем. В случае превышения допустимого давления в контуре рабочей жидкости избыток жидкости сбрасывается через предохранительный клапан обратно в гидробак. Чтобы поддерживать чистоту рабочей жидкости в сливной линии установлен фильтр.

Для дополнительного охлаждения рабочей жидкости в сливной линии имеется маслоохладитель [1].

Таким образом, благодаря патентному и аналитическому обзорам объекта, выявлены и решены проблемы имеющейся гидросистемы. Сформированы критерии качества и анализ характеристик объекта. Спроектирована модернизированная гидравлическая система.

Библиографический список

1. Хазиев, И.С. Гидравлическая система гидрофицированной шагающей машины. [Электронный ресурс] – URL: https://e-library.ufa-rb.ru/doc/info?key=ru%5Cusatu%5Cvkrebs%5C2405.

2. Шагающий эскаватор *Menzi Muck* [Электронный ресурс] URL: https://www.menzimuck.com/produktgruppen/menzi-muck-schreitbagger/ (дата обращения: 12.11.2024).

3. История шагающих экскаваторов [Электронный ресурс] URL: https://www.menzimuck.com/unternehmen/geschichte/ (дата обращения: 11.11.2024).

4. Васильченко, В.А. «Гидравлическое оборудование мобильных машин»: справочник – М.: Машиностроение, 1983. – 301 стр., ил.

© Минигулова Д.А., 2024

УДК 537

Р.А. МУСИН
ramusjet@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПЛАЗМЕННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация: плазменные генераторы электроэнергии представляют собой инновационную технологию, основанную на использовании плазмы (четвертого состояния вещества). Основная цель данной статьи – рассмотреть основные принципы работы плазменных генераторов, их преимущества и недостатки, а также перспективы развития.
Ключевые слова: плазменные генераторы; плазматрон; плазма.

По мере увеличения потребностей в энергии и истощения традиционных источников, таких как уголь, нефть и газ, исследование альтернативных и устойчивых решений становится все более актуальным. Плазменные

генераторы, использующие плазму для генерации электроэнергии, представляют собой одно из таких решений. Они обещают высокую эффективность и низкие выбросы углекислого газа, что делает их потенциально привлекательными для применения в энергетическом секторе.

Плазма является ионизированным газом, состоящим из свободных электронов и ионов. Она образуется при высокой температуре (более 8000 С) или под воздействием сильных электрических полей. Плазма обладает уникальными свойствами, такими как высокая электропроводность и чувствительность к магнитным полям [1].

Плазменные генераторы могут работать по различным принципам.

Термоэлектрическая генерация: использует высокие температуры плазмы для прогревания термоэлектрических материалов, которые генерируют электричество при разнице температур.

Генерация по принципу магнитного удержания: основывается на использовании магнитных полей для удержания и контроля плазмы, что позволяет эффективно использовать ее для производства электроэнергии.

Плазменные реакторы: применяют реакции синтеза или другие экзотермальные реакции для генерации энергии, где плазма служит катализатором [2].

Работа плазменных генераторов осуществляется в три этапа: создание плазмы; удержание плазмы; генерация электроэнергии.

На первом этапе плазма может быть создана с помощью различных методов, таких как ионизация газа с использованием высоковольтных разрядов или лазеров.

На втором этапе удержание плазмы осуществляется с применением магнитных полей или других методов, которые предотвращают контакты плазмы с окружающей средой [3].

На третьем этапе плазма используется для преобразования энергии в электричество, что может происходить через различные физические и химические процессы.

Хорошим примером применения плазмы является плазматрон. Плазматрон – это устройство, использующее плазменную технологию для различных промышленных и научных целей. Оно находит применение в таких областях, как сварка, резка, обработка материалов, а также в системах плазменной диагностики и исследованиях в области физики и химии.

Плазматрон работает на основе создания и поддержания высокотемпературной плазмы – ионизированного газа, который состоит из положительно заряженных ионов и свободных электронов. Для генерации плазмы в плазматроне используется электрический ток, который проходит через газ, например, аргон или азот. При этом газ ионизируется, и образуется плазма, способная достигать температур несколько тысяч градусов Цельсия.

Ключевыми элементами плазматрона являются:

1. Источник питания: обеспечивает необходимое напряжение и ток для создания плазмы.

2. Электроды: служат для создания электрического поля, которое способствует ионизации газа.

3. Газовая камера: в этой части устройства происходит заполнение газа, который будет ионизирован.

4. Система охлаждения: важна для предотвращения перегрева элементов плазматрона во время его работы.

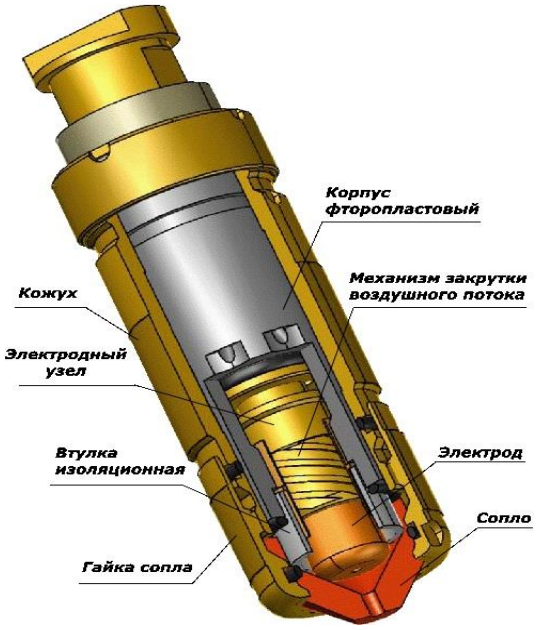


Рис. 1. Строение плазматрона [4]

Преимущества плазменных генераторов заключается в их высокой эффективности за счет высокой степени преобразования энергии. Благодаря использованию чистых процессов генерации энергия выделяется с минимальными выбросами углекислого газа и других загрязняющих веществ. Еще одно преимущество плазмы: она может быть создана из множества различных газов и материалов, что делает технологию универсальной.

Хоть у плазменных генераторов много плюсов, важно помнить о негативных аспектах. Создание и управление плазмой требует сложного оборудования и технологий. Также на текущем этапе разработки плазменные генераторы требуют значительных инвестиций для создания. Есть также проблемы с масштабируемостью. Для разработки коммерчески жизнеспособных решений необходимо решить задачи, связанные с масштабированием технологий [5].

На ГРЭС в Рязани функционирует комбинированный блок с МГД-генератором (магнитогидродинамический генератор) в 300 мВт, КПД которого превышает 45%, в то время как КПД теплостанций очень редко достигает даже 35%. В установке используется раскаленная до 2800 С плазма,

полученная в процессе сгорания газа, и высокомощный проводящий магнит. *Плазменная технология позволяет использовать углеводородные и биомассовые топлива более эффективно, снижая при этом негативное воздействие на окружающую среду.*

Получается, что энергетика, основанная на нагревании плазмы, это уже реальность? Но не все так просто. Подобных опытных образцов в мире насчитывается всего несколько штук, и всем им больше 50 лет.

Причин тому несколько. Во-первых, для эффективной работы МГД-генераторов необходимы конструкционные материалы с высочайшей степенью жаропрочности, подобные тем, что были разработаны в ходе реализации программ ядерного синтеза. Аналоги таких материалов и сейчас используются в космической отрасли, но остаются засекреченными. Как бы там ни было, это весьма дорогостоящие материалы, способные свести на нет экономический эффект от промышленного применения плазменных генераторов.

Разработка плазменных генераторов электроэнергии только начинает набирать популярность и требует дальнейших исследований. Однако потенциальные выгоды от их применения в энергетическом секторе огромны. Институты и компании по всему миру активно ведут работу над улучшением технологий, включая: оптимизацию процессов и сокращение затрат; разработку эффективных систем удержания плазмы; исследование применения различных материалов для генерации плазмы[6].

Подводя итоги, следует сказать, что данная тема выбрана мной, так как увеличение применений базовых технологий и расширение внедрения плазменных технологий весьма перспективно для социально-экономического развития страны. Будущее стоит за плазмой, её уникальные свойства делают возможным улучшение технологий и процессов, повышая их эффективность и безопасность. Научные исследования в этой области продолжаются, и будущее плазменных технологий выглядит многообещающим, открывая новые горизонты для инноваций и улучшения качества жизни.

Библиографический список

1. Шар плазмы [Электронный ресурс] – URL: https://jooinn.com/plasma-ball.html.

2. Магнитогидродинамический генератор [Электронный ресурс] – URL: https://genmaster.ru/about/articles/magnitogidrodinamicheskiy-generator/.

3. Плазматрон [Электронный ресурс] – URL: https://splav-gun.ru/rabota-s-metallom/plazmennaya-gorelka-2.html.

4. Строение плазматрона [Электронный ресурс] – URL: https://svarkaspec.ru/rezka-metallov/plazmennaya-rezka-metallov.html.

5. Генератор плазмы [Электронный ресурс] – URL: https://refanalahealth.com/welcome-to-our-blog/.

6. Рязанская ГРЭС [Электронный ресурс] – URL: https://www.ogk2.ru/rus/branch/r yazangres/.
7. МГД-генератор. [Электронный ресурс] – URL: https://principraboty.ru/mgd-generator-princip-raboty/.

© Мусин Р.А., 2024

УДК 62-822

А.Р. МУХАМАДУЛЛИНА
Amukhamadullina@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент С.Ю. КОНСТАНТИНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГУСЕНИЧНОГО ПОГРУЗЧИКА

Аннотация: в данной статье приведен обзорный анализ гусеничного погрузчика. Выделены его плюсы и минусы, актуальность. Рассмотрена гидравлическая схема прототипа и модернизирована.
Ключевые слова: гусеничный погрузчик; гидросистема гусеничного погрузчика; гусеничный ход.

Гусеничный погрузчик – это специализированная техника на гусеничном ходу, предназначенная для погрузочных работ. В конструкцию данной машины входят погрузочный механизм и ходовая часть. К погрузочному механизму относятся: привод; погрузочный ковш; стрела. К ходовой части относятся: гусеницы; кабина водителя; несущая рама.

За счет гусеничного хода данные машины обладают хорошей проходимостью в условиях бездорожья и устойчивостью. Связано это с тем, что гусеницы, в сравнении с колесами, имеют большую площадь и, соответственно, обладают низким давлением на почву, за счет чего и повышается проходимость и устойчивость на различных типах грунта. Также стоит отметить, что за счет гусениц данные машины обладают хорошей грузоподъемностью.

К минусам гусеничных погрузчиков можно отнести низкую скорость, которая обусловлена тем, что гусеницы имеют большую площадь контакта с землей, за счет чего повышается сила трения. Также стоит отметить, что из-за большого веса и габаритов данная машина не может передвигаться по дорогам общего пользования.

Несмотря на свои минусы, обусловленные наличием гусениц, данные погрузчики хорошо востребованы. Гусеничные погрузчики используются при строительстве и ремонте дорог общего пользования.

При строительстве новых дорог проводятся землеройные работы, которые сопровождаются большим количеством грязи, редко устойчивой почвой и непроходимыми дорогами. В таких условиях колесные погрузчики не справляются, и на их замену используют погрузчики на гусеничном ходу. Они легко преодолевают такие препятствия как бездорожье и легко справляются с погрузочными работами. Да, гусеничные погрузчики обладают небольшой скоростью, но данные машины используются только для погрузочных работ, в которых скорость передвижения не так важна.

Также данные машины используются в таких отраслях как сельское хозяйство, лесное хозяйство, горнодобывающая промышленность. Часто данные машины привлекаются и к работам в городе, они легко справляются с уборкой снега в зимний период.

В качестве прототипа для разработки гидравлической схемы гусеничного погрузчика была выбрана гидросистема одноковшового фронтального колесного погрузчика. На рис. 1 изображена схема данной машины.

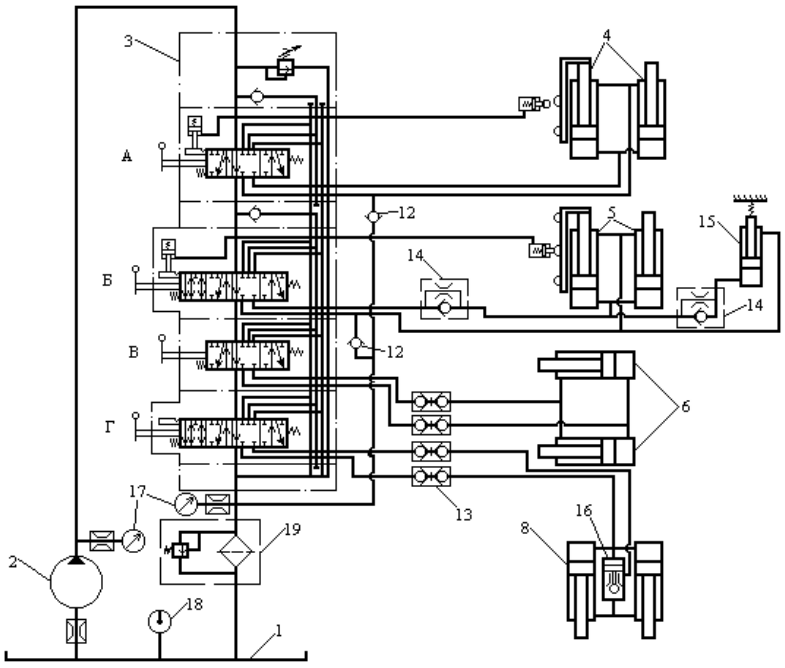


Рис. 1. Гидравлическая система колесного погрузчика [1]

Данная гидросистема состоит из: *1* – бак; *2* – насос; *3* – секционный распределитель (золотник *А* управляет гидроцилиндрами поворота ковша, золотник *Б* управляет гидроцилиндрами подъема и опускания стрелы, золотник *В* управляет гидроцилиндрами перемещения двухчелюстного ковша, золотник *Г* управляет гидроцилиндрами подъема и опускания рабочего органа рыхлителя); *4* – гидроцилиндры поворота ковша; *5* – гидроцилиндры подъема и опускания стрелы; *6* – гидроцилиндры перемещения двухчелюстного ковша; *8* – гидроцилиндры подъема и опускания рабочего органа рыхлителя; *12* –

обратные клапаны; *13* – разъемные соединения; *14* – дроссели с обратным клапаном; *15* – гидравлический амортизатор; *16* – гидрозамки; *17* – манометры; *18* – датчик температур.

Колесный погрузчик, рассмотренный в прототипе, не регулируется по скорости, т. е. данная машина имеет только один скоростной режим, т. к. установлен нерегулируемый насос *2* (см. рис. 1). Модернизируя прототип, мы заменили нерегулируемый насос *2* на регулируемый насос *Н1* (рис. 2), тем самым позволив регулировать скорость движение машины. Также, добавление двух гидромоторов *ГМ1* и *ГМ2* для левого и правого гусеничного хода (рис. 2) позволяет увеличить проходимость машины. В свою очередь, для подпитки гидромоторов *ГМ1* и *ГМ2* был добавлен подпиточный насос *НП1* (рис. 2).

На рис. 2 представлена модернизированная схема колесного погрузчика.

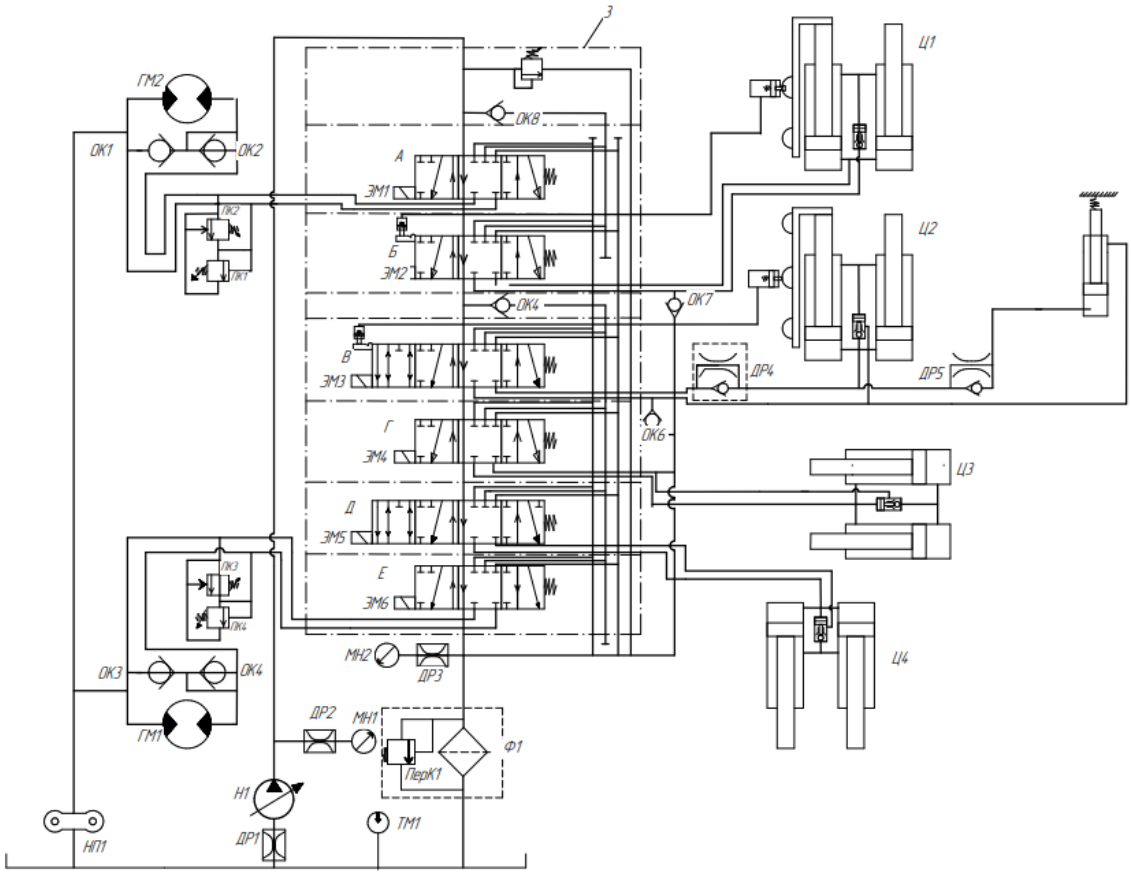


Рис. 2. Гидравлическая схема гусеничного погрузчика

Принципиальная гидравлическая схема гусеничного погрузчика включает в себя: гидробак закрытого типа; регулируемый насос *Н1*, который подает рабочую жидкость к секционному распределителю *3*, который, в свою очередь, включает в себя гидрораспредели для поворота ковша (*Б*), для подъема и опускания стрелы (*В*), для перемещения заслонки двухчелюстного ковша (*Г*), для подъема и опускания рабочего органа (*Д*), для левого хода (*А*) и правого хода (*Б*).

Модернизированная схема позволяет осуществлять управление гидромоторами и гидроцилиндрами гидрораспределителями с электромагнитным управлением *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*, *Е*. Также, в линию гидроцилиндра *Ц2* вмонтированы дроссели с обратным клапаном *ДР4* и *ДР5*. Рабочая жидкость очищается фильтром *Ф1*, к которому подключен переливной клапан *ПерК1* и в напорной линии установлены манометры *МН1* и *МН2*.

Помимо изменений, связанных с решением проблем в виде плохой проходимости и нерегулируемости скорости, были внесены и другие изменения, связанные с переходом на более современное оборудование.

Во-первых, было решено отказаться от использования быстроразъемных соединений под пунктом *13* в рис. 1. Связано это с упрощением гидравлической системы. Во-вторых, к гидроцилиндрам *4*, *5* и *6* были добавлены гидрозамки, которые препятствуют перетоку жидкости при выполнении работ на горных местностях.

В заключение можно сказать, что гусеничный погрузчик – это техника, сфера применения которой обширна. Эта машина обладает как своими достоинствами, так и незначительными недостатками в сравнении со своим колесным прототипом.

С внедрением изменений получена усовершенствованная гидравлическая схема колесного погрузчика – схема гусеничного погрузчика.

Библиографический список

1. Машиностроительный гидропривод: Методические указания по выполнению курсовой работы / Уфимск. госуд. авиац. техн. ун-т: сост. В.А. Целищев. Уфа, 2008. – 28 с.

2. Целищев, В.А. Расчет и проектирование объемного гидравлического привода: учебное пособие [Электронный ресурс] / Уфимск. Гос. Авиац. Техн. Ун-т. – Уфа.

3. Tracked loader [Электронный ресурс] //https://en.wikipedia.org/wiki/Tracked_loader.

© Мухамадуллина А.Р., 2024

УДК 656.02

Т.И. НАДЫРГУЛОВА
nadyrgulovatansulpan@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ВЛИЯНИЕ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА НА ДОРОЖНУЮ СИТУАЦИЮ НА ВЪЕЗДЕ В Г. УФА В РАМКАХ ПРОЕКТА «ЮЖНЫЕ ВОРОТА»

Аннотация: в статье была рассмотрена дорожно-транспортная ситуация в г. Уфа, проведен анализ методом визуального подсчета интенсивности движения транспортных средств на Южном въезде в данный момент и после

строительства моста через реку Белая в рамках проекта «Южные ворота». *Ключевые слова*: дорожная сеть; транспорт; транспортные заторы; проект «Южные ворота».

Одной из главных проблем развивающихся городов является рост автомобилизации. К сожалению, дороги не могут расти с такой же скоростью, как и количество машин в городах-миллионниках. Столица Республики Башкортостан не является исключением. Рост автомобилей часто приводит к ряду негативных последствий. И одним из самых загруженных мест является южный въезд в г. Уфа.

Исходя из анализа агентства «Автостат» в ГО г. Уфа было зарегистрировано 370 тыс. единиц автомобильных транспортных средств (АТС) на 01.01.2024. Наибольшую долю в парке АТС составляют легковые автомобили (325 тыс. единиц, 88%). Из чего можно сделать вывод, что транспортный поток при высокой плотности дает малую провозную способность [1]. Доля категорий транспортного потока представлена на рис. 1.



Рис. 1. Распределение АТС по типам ТС в ГО г. Уфа

Уфимцы отдают предпочтение собственному транспорту, нежели общественному. Прирост личного легкового транспорта жителей столицы оценивается примерно в 2% ежегодно. Из-за этого уровень автомобилизации в городе будет постепенно расти, что приведет к образованию ряда проблем, в частности к пробкам и загруженностям дорог.

Утренний и вечерний часы пик обычно характеризуются наибольшей интенсивностью дорожного движения. В это время дня наибольшее количество

автомобилей направляется к местам работы, учебы и обратно. Утренний час пик на дорогах Уфы начинается в 8:30 и заканчивается в 9:20. Ближе к полудню загруженность падает, а затем к обеденному времени начинает расти. Вечерний час пик в столице Башкортостана длится дольше в связи с большим скоплением машин в городе и тем, что покинуть его непросто. В 17:00 пробки резко растут и достигают пика с 18:10 до 19:10. В эти часы пробки достигают 7–8 баллов [2].

Интенсивность дорожного движения в Уфе, как и в других крупных городах, является результатом взаимодействия различных факторов и может меняться в зависимости от конкретной ситуации.

Высокая интенсивность движения на Южном въезде в город представляет собой серьезную проблему, влияющую на множество аспектов городской жизни. Для ее решения необходимы комплексные и координированные усилия городских властей, бизнеса и общественности.

В соответствии с масштабными планами Правительства Республики и городской администрации по увеличению жилой застройки микрорайонов Цветы Башкирии, Кузнецовский Затон и Забелье генеральным планом определены первоочередные мероприятия по строительству новых мостовых переходов. Они должны разгрузить существующие мосты, работающие на пределе своей пропускной способности, а также обеспечить транспортной инфраструктурой новые застраиваемые территории.

Одним из таких мероприятий является проект «Южные ворота», первоочередная задача которого – сооружение шестиполосной дороги с мостовым переходом через реку Белая. На втором месте четырехполосная дорога в обход микрорайона Цветы Башкирии с устройством двухуровневых транспортных развязок с автодорогами М5 и Уфа–Аэропорт (рис. 2).

Для проведения анализа дорожной обстановки нужно учитывать следующие характеристики (в течение часа) транспортного потока на участке 10–18 км автомобильной дороги Уфа–Аэропорт–Оренбург:

1) состав транспортного потока;
2) интенсивность транспортного потока;
3) плотность транспортного потока;
4) скорость движения транспортного потока [3].

Учтем тот факт, что данный проект не затронет все транспортные средства (ТС), которые ежедневно проезжают по Южному въезду, так как путь через Кузнецовский Затон может быть актуален не для всех. Потенциальными пользователями мостового перехода являются жители таких районов, как Кузнецовский Затон, Зелёная Роща, Сипайлово и южной агломерации города.

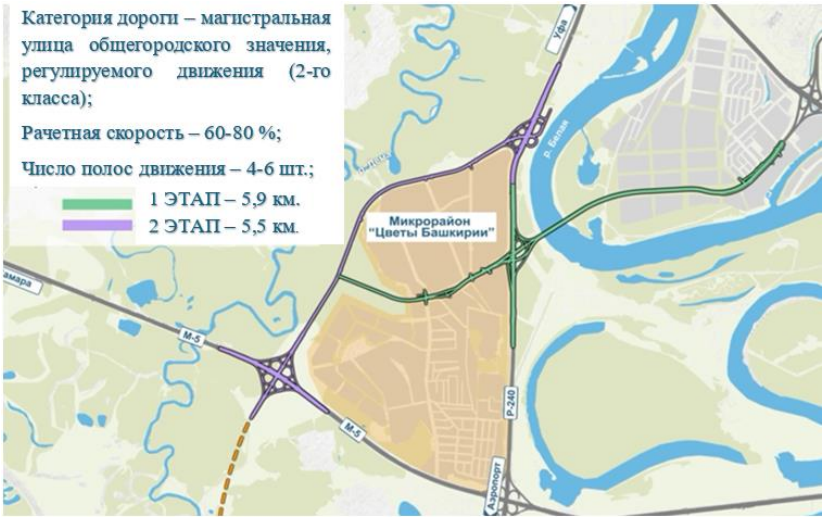


Рис. 2. Этапы проекта «Южные ворота»

Общая численность населения этих районов составляет 170 тыс. человек. Учитывая активные застройки в данных жилых районах, это количество будет расти.

Рассчитаем интенсивность транспортных средств визуальным методом на данном участке в утренний час пик.

Общая интенсивность потока по обеим сторонам определена в прямом и обратном направлении, равная 7232 и 4897 единицам соответственно. Всего интенсивность на участке равна 12129 ед./час.

Такие же вычисления произведем для вечернего времени.

Общая интенсивность потока по обеим сторонам определена в прямом направлении, равна 5964 единицам, и в обратном направлении 2985. Всего интенсивность на участке равна 8949 ед./час.

Рассчитаем среднюю интенсивность потока в час пик по формуле (1):

$$N_{ср} = \frac{N1 + N2}{2}, \quad (1)$$

$$N_{ср} = \frac{12129+8949}{2} = 10\ 539 \text{ ед./час.}$$

Расчетная суточная интенсивность движения определяется по формуле (2):

$$N_с = \frac{N_ч}{a_ч}, \quad (2)$$

где $N_ч$ – расчетная часовая интенсивность движения; $a_ч$ – доля всех автомобилей, прошедших за 1 час пик от общего суточного числа автомобилей, обычно принимается $a_ч = 0{,}076$.

$$N_с = \frac{10539}{0.076} = 138671 \text{ ед./сут.}$$

Визуальным методом подсчитаем транспортные средства, которые на данном участке в утренний и вечерний час пик направляются в сторону Кузнецовского Затона и Зеленой Рощи с Южного въезда и наоборот:

$$N_{ср} = \frac{3032+2237}{2} = 2635 \text{ ед./час,}$$

$$N_c = \frac{2635}{0.076} = 34671 \text{ ед./сут.}$$

Результаты подсчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты подсчета ТС на участке

Южный въезд (сейчас)		
	Час пик	Сутки
Всего ТС, кол-во	10539	138671
В город, кол-во	6064	79790
Из города, кол-во	4475	58881
Южный въезд (после строительства моста)		
	Час пик	Сутки
Всего ТС, кол-во	7904	104000
В город, кол-во	4548	59848
Из города, кол-во	3356	44152

После определения потенциальных пользователей моста видно, что интенсивность, приходящаяся на Южный въезд, сократится на 25%. Новый мостовой переход в составе Южных Ворот позволит создать альтернативный способ пересечения реки Белая, а также разгрузит главный въезд города.

В статье была проанализирована дорожно-транспортная ситуация в городе и конкретно на южном въезде в г. Уфа. Организация движения на нем не обеспечивает пропускную способность в соответствии с измеренной интенсивностью. В среднем, через этот участок проезжает около 140 тысяч транспортных средств в сутки на 2024 год. Это негативно сказывается на дорожную сеть города в целом: приводит к большим заторам; увеличивает время в пути; снижает безопасность дорожного движения. Данный участок нуждается в реорганизации движения на нем, которая в данном проекте представлена в виде введения четырехполосной развязки с мостовым переходом в Кузнецовский Затон. Воспользовавшись подсчетом транспортных средств визуальным методом было определено: внедрение моста снизит транспортный поток на нём на 25%, что положительно скажется на интенсивности Южного въезда.

Библиографический список

1. Аналитическое агентство «Автостат». [Электронный ресурс]. URL: https://www.autostat.ru (дата обращения: 20.04.2024).

2. Час пик в городе Уфа. [Электронный ресурс]. URL: https://ufatime.ru (дата обращения: 20.04.2024).
3. Расчет интенсивности движения. [Электронный ресурс]. URL: https://studfile.net (дата обращения: 20.04.2024).
4. Федеральный закон «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 08.11.2007 N 257-ФЗ. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru (дата обращения: 23.05.2024).
5. Яндекс карты. [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/maps (дата обращения: 12.05.2024).
6. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Формирование единого парковочного пространства в городах Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: https://www.garant.ru (дата обращения: 18.05.2024).

© Надыргулова Т.И., 2024

УДК 623.746.4

В.С. ПАВЛОВА
pavlotti14.10@gmail.com
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ГРУЗОВОЙ КВАДРОКОПТЕР С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Аннотация: рассмотрена актуальность создания грузового квадрокоптера, в котором будет использован гидравлический привод, а также сферы применения и вытекающие характеристики. Выявлены основные проблемы современных многовинтовых беспилотных летательных аппаратов, ограничивающих их грузоподъемность и возможности применения. Осуществлен патентный обзор.
Ключевые слова: грузовые квадрокоптеры; гидравлический привод; грузоподъемность; мультироторные беспилотные летательные аппараты.

В наше время активно развиваются технологии, в том числе и авиация. Основной проблемой являются перевозки на довольно большие расстояния за короткое время. Одним из способов решения является создание такого устройства, которое способно над землей, во избежание пробок и аварийных столкновений, перевозить груз за короткий промежуток времени на ощутимо большую дистанцию. В 21 веке начался активный ввод в использование

квадрокоптеров. Они способны преодолевать длинный путь и доставлять весомые грузы в труднодоступные места для наземного транспорта. Именно по этим причинам основной областью применения квадрокоптеров являются: доставка; помощь в спасательных операциях; медицинские перевозки.

Использование данного беспилотного летательного аппарата для служб МЧС и служб скорой медицинской помощи является ключевым. В связи с этим грузоподъемность должна быть от 100 до 300 кг, чтобы была возможность перевозить людей, которым нужна экстренная помощь, а также справляться с расстояниями от 150 до 1000 км за короткий промежуток времени. На данный момент широко известны беспилотные летательные аппараты, в которых несущие винты приводятся в движение электродвигателями, питающимися от аккумуляторных батарей. Ввиду таких характеристик могут возникнуть проблемы при использовании, так как электрический привод и аккумуляторные батареи не способны реализовать при большой грузоподъемности многовинтового летательного аппарата интересующую дальность полета. Так же в моделях, где используется электрический способ передачи энергии от двигателя к несущим винтам, недостатком является большой вес электрической трансмиссии.

Вследствие выше озвученных проблем возникает необходимость в разработке и создании мультироторного беспилотного летательного аппарата, в основе которого будет лежать не электрический, а гидравлический привод и двигатели внутреннего сгорания для обеспечения дальности полета и мощности квадрокоптера [1].

На данный момент имеется несколько патентов на полезную разработку многовинтового летательного аппарата с гидравлическим приводом.

В патенте RU181367U1 «Многовинтовой летательный аппарат с гидравлическим приводом несущих винтов с фиксированным шагом лопастей», авторами которого являются Фролов Б.М., Фролова О.Л., Фролов М.Б., описывается гидравлический привод с замкнутой системой циркуляции, что приводит к нагреву рабочей жидкости и возможным утечкам. Данную проблему решают путем установки теплообменников, но в связи с этим увеличивается стоимость установки. Одним из недостатков данной модели является отсутствие предохранительных клапанов, что негативно скажется в случае аварийной ситуации. Так же к каждому, из четырех имеющихся, регулируемому насосу «идет в комплект» свой индивидуальный фильтр, что является недостатком в данном случае, так как увеличиваются массогабаритные характеристики беспилотного летательного аппарата [2].

В патенте RU2808657C1 «Гидропривод многовинтового летательного аппарата», авторами которого являются Целищев В.А., Целищев Д.В., Хакимов И.С., описывается гидравлический привод с разомкнутой системой циркуляции, где из бака рабочая жидкость подается насосом к четырем гидромоторам, регулирование частоты вращения ротора осуществляется

многопозиционным четырехлинейным распределителем, с помощью которого и регулируется частота вращения несущего винта летательного аппарата [3].

Данная модель не имеет явных недостатков, но, к сожалению, нет достоверной информации о реализации испытаний, что не позволяет заверить о безопасных перевозках на длинные дистанции людей или хрупкого тяжелого груза.

На данный момент промышленный комплекс Edgefield, находящийся в Шотландии, произвел на свет первый беспилотный летательный аппарат, в основе которого лежит гидравлика. Они заявляют, что Flowcopter может летать более 2-х часов, преодолевая расстояние до 300 км. Упор в использовании данного грузового квадрокоптера идет на поисковые и спасательные операции, а также для доставки. Производители заявляют, что созданный ими беспилотный летательный аппарат способен перевезти некоторое количество пакетов крови в места чрезвычайных происшествий. Коптер способен работать в сложных условиях за счет герметичных гидравлических двигателей [4].

Библиографический список

1. V Международная научно-техническая конференция, посвященная 95-летию со дня рождения член-корр. РАН, д-ра техн. наук, профессора Рыфата Рахматулловича Мавлютова. «Прикладная гидромеханика и газодинамика», Том 4. УДК 629.7.04 (Дата обращения: 23.03.2024).

2. Патент RU181367U1. Авторы: Фролов Б.М., Фролова О.Л., Фролов М. Б. (Дата обращения: 23.03.2024).

3. Патент RU2808657C1. Авторы: Целищев В.А., Целищев Д.В., Хакимов И.С. (Дата обращения: 23.03.2024).

4. Flowcopter: официальный сайт. – URL: https://www.flowcopter.com (Дата обращения: 29.03.2024).

© Павлова В.С., 2024

УДК 629.3.033

К.А. ПАНЬКОВ
Kirill.pankov.00@gmail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доцент С.Ю. КОНСТАНТИНОВ
Уфимский университет науки и технологий

ГУСЕНИЧНЫЙ ВЕЗДЕХОД С НАВЕСНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Аннотация: в статье рассматривается гидравлическая система гусеничного вездехода и его недостатки. Представлена модернизация гидропривода вездехода.

Ключевые слова: гусеничный вездеход; гидромеханика; регулируемый насос.

Гусеничный вездеход – это транспортное средство, специально разработанное для перемещения по пересеченной местности и бездорожью. Их используют в районах, где нет дорог или где по ним трудно проезжать. Гусеничные вездеходы обладают высокой проходимостью благодаря гусеницам, обеспечивающим отличный ход и низкое давление на грунт.

Актуальность гусеничных вездеходов для нашей страны высока, поскольку такие машины широко используются в самых суровых климатических условиях и на пересеченной местности. Они способны преодолевать снежные заносы, водные преграды и уклоны крутизной до 30 градусов, что делает их незаменимыми в труднодоступных районах с неблагоприятными погодными условиями.

В мире гусеничные вездеходы производит ряд ведущих стран, таких как: США; Швеция; Финляндия; Франция; Германия; Китай. Они же и являются основными потребителями. Однако российский рынок занимает доминирующее положение, поскольку именно в России гусеничные вездеходы изначально использовались как машины повышенной проходимости. В связи с огромным спросом на эту технику в нашей стране необходимо проводить модернизацию и устранять неисправности машины.

В данной статье представлена модернизация гусеничного вездехода российского производства отечественным гидрооборудованием.

В качестве прототипа для разработки гидравлической системы была выбрана гидросистема гусеничного вездехода ГАЗ-34039 (рис. 1).

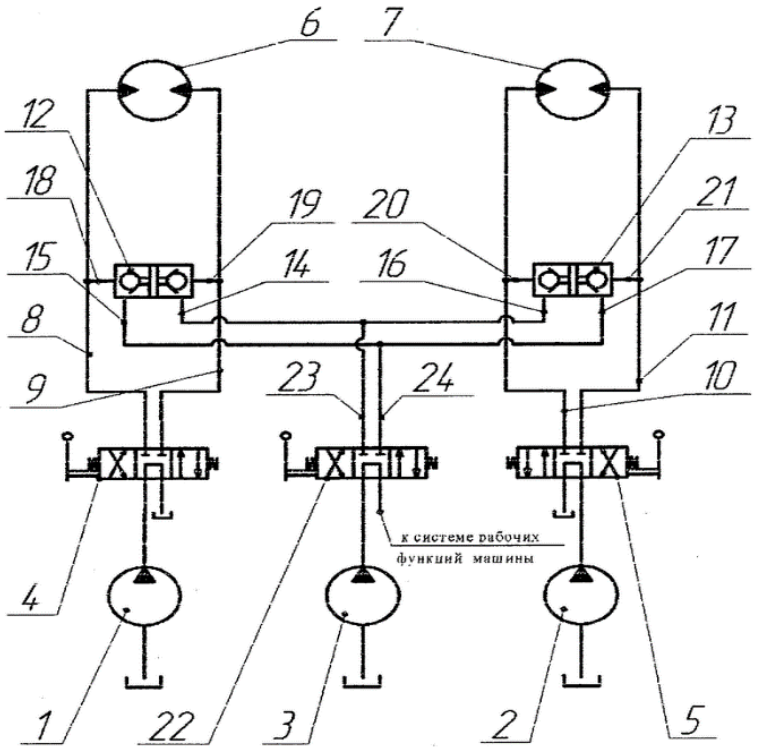


Рис. 1. Гидравлическая схема гусеничного вездехода ГАЗ-34039

В данной схеме одним из главных недостатков является невозможность регулирования скорости хода гусениц из-за нерегулируемых насосов.

Лучшее решение данной проблемы – установка регулируемых насосов. Для достижения данной цели были рассчитаны и подобраны регулируемые насосы и спроектирована принципиальная схема вездехода (рис. 2).

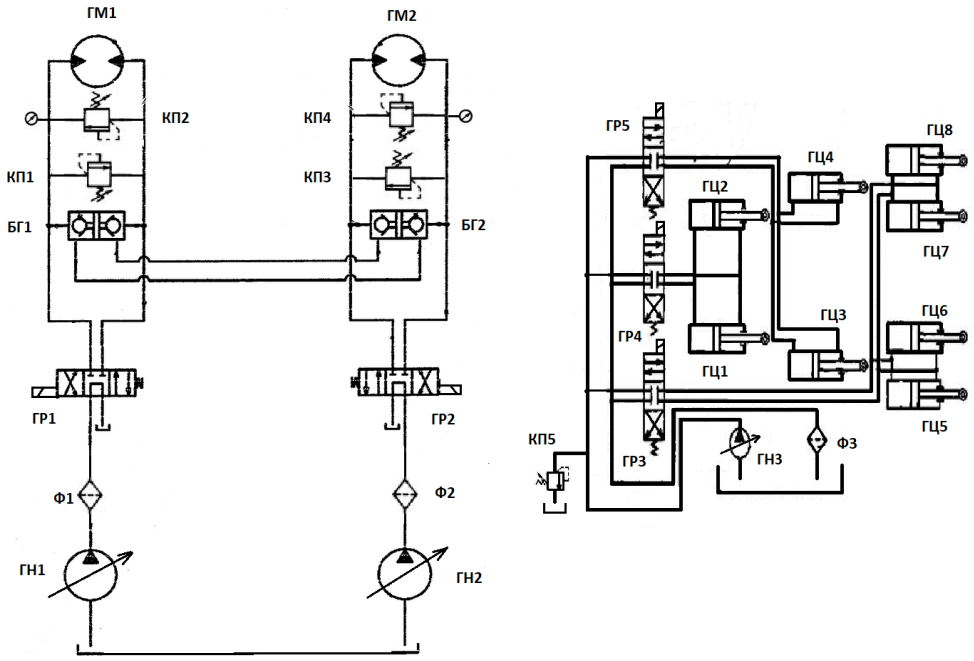


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема гусеничного вездехода ГАЗ-34039

Исходные данные для подбора гидрооборудования:

– номинальное давление насоса $P_{\text{Н}}$ = 25 МПа;

– максимальная подача насоса $Q_{\text{эф}}$ = 0,0033 м^3/с;

– номинальная частота вращения n = 35 об/с;

– угол наклона блока $\gamma_{max} = 25^0$;

– общий КПД насоса $\eta = 0{,}88 \div 0{,}9$;

– объёмный КПД насоса η_o = 0,98;

– механический КПД насоса $\eta_{мех}$ = 0,95.

Зная нагрузки и усилия, предъявляемые данной спецтехнике, было рассчитано и подобрано гидрооборудование от отечественного производителя ОАО «Пневмостроймашина» (рис. 3).

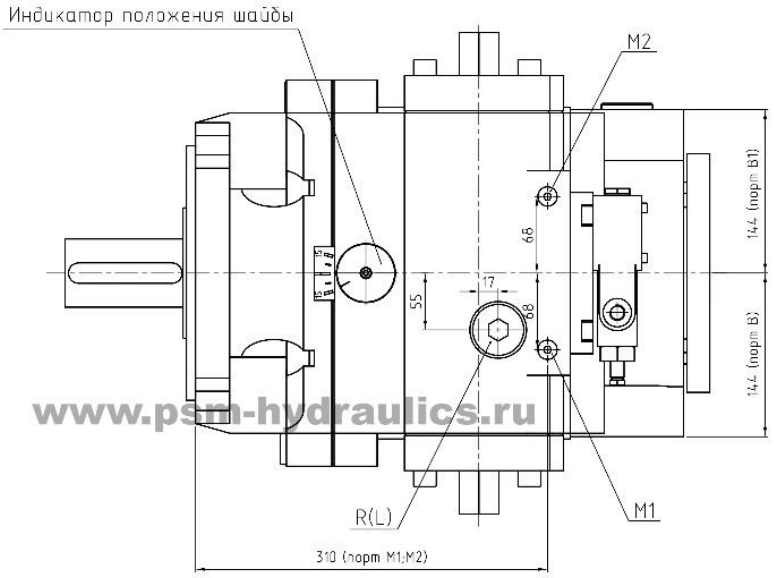


Рис. 3. Конструкция насоса серии 415 ОАО «Пневмостроймашина»

На рис. 4 представлены полученные характеристики.

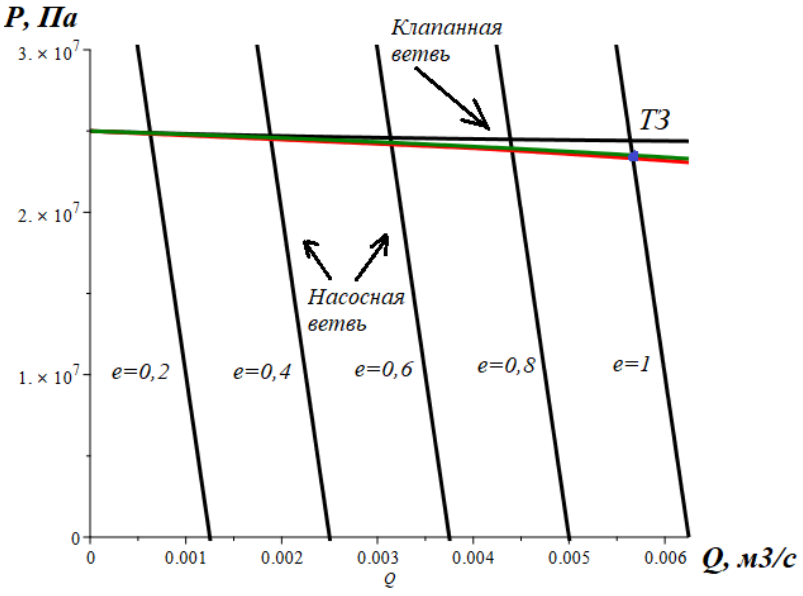


Рис. 4. Внутренние характеристики гидропривода

На графике показана линия давления и необходимый расход гидропривода. Из рисунка видно, что гидравлические потери составляют не более 10%.

В заключение отметим, что регулируемый насос гусеничного вездехода лучше, поскольку обеспечивает более точное управление гидравлическим давлением, что позволяет оптимизировать работу машины и повысить его эффективность. Также регулируемый насос дает возможность изменять

давление в зависимости от текущих потребностей, что снижает нагрузку на компоненты системы и продлевает срок их службы.

Библиографический список

1. Регулируемые насосы 415 серия [Электронный ресурс] https://www.psm-hydraulics.ru/313-seriyareguliruemye-nasosy.htm.
2. Васильченко, В.А. «Гидравлическое оборудование мобильных машин»: справочник – М.: Машиностроение, 1983. – 301 стр., ил.
3. Азизов, А.Г., Азизов, М.Г., Рагимов, А.М. Проектирование гидро- и пневмосистем (для студентов специальности «Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика»): учебное пособие / А.Г. Азизов, М.Г. Азизов, А.М. Рагимов, отв. ред. М.А. Караев – Баку, 2004 – 100 с.
4. Регулируемые насосы 313 серия [Электронный ресурс] https://www.psm-hydraulics.ru/313-seriyareguliruemye-nasosy.htm.

© Паньков К.А., 2024

УДК 33.01

И.И. САБАХОВ
isabahovilya@gmail.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ВЫСОТНАЯ СКЛАДСКАЯ ТЕХНИКА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СКЛАДА

Аннотация: в современных условиях логистики и управления цепями поставок увеличение эффективности складских операций является важным аспектом конкурентоспособности предприятия. Одним из решений, способствующих оптимизации работы склада, является внедрение высотной складской техники. В статье рассматриваются типы высотной техники, их преимущества, влияние на ключевые показатели эффективности склада.
Ключевые слова: высотная складская техника; ричтрак; штабелёр; оптимизация.

Складская логистика играет ключевую роль в обеспечении бесперебойных цепей поставок. В настоящее время в сфере складской логистики прослеживаются следующие тенденции:

- увеличение объёмов хранимых товаров;
- рост ассортимента товаров;
- необходимость сокращения времени обработки заказов.

Эти тенденции требуют применения инновационных решений. Одним из таких решений является внедрение высотной техники. Высотная складская техника представляет собой специализированное оборудование (рис. 1), предназначенное для работы с грузами на больших высотах (от 10 метров и более).



Рис. 1. Внешний вид высотной складской техники (ричтрак)

Главным недостатком рассматриваемой техники является невозможность её применения в некоторых складских помещениях и комплексах, так как они должны иметь высокие потолки (не менее 10 м), позволяющие установку многоуровневого стеллажного оборудования. Согласно классификации, разработанной компанией «Knight Frank», высотная техника должна использоваться только на складах класса «А» и его подкласса «А+». Также к недостаткам относятся более сложное обслуживание, в сравнении со стандартным складским оборудованием, и тяжесть управления, что может привести к аварии на складе.

К преимуществам высотной техники относится более эффективное использование пространства за счет увеличения полезного объёма склада путём увеличения максимальной высоты хранения, соответственно увеличения числа стеллажных систем, используемых для хранения.

Также снижаются операционные затраты, такие как аренда складских площадей и содержание штаба сотрудников, благодаря оптимизации складского пространства, т.к. за счет этого плотность размещения товара увеличивается, а операторы высотной техники работают с меньшим уровнем физического напряжения, что позволяет увеличить объем операций на одного сотрудника.

К основным видам высотной техники относятся:

– высотные штабелёры (оборудование, представляющее собой транспортное средство, оборудованное подъёмным механизмом, необходимым

для осуществления подъёма и размещения паллет на высотных стеллажах). В основном штабелёры не имеют полноценной кабины и, соответственно, посадочного места для водителя;

– ричтраки (универсальная техника, сочетающая маневренность, высокую грузоподъёмность и эффективность).

Преимущества ричтрака перед штабелёром заключаются в следующих конструктивных особенностях: наличие выдвижной каретки, что позволяет управлять вилами, на которых расположен паллет, не перемещая кабину оператора; более высокая скорость перемещения, что даёт ему преимущество в узкопроходных складах.

Несмотря на это, у ричтрака есть и недостатки, такие как дороговизна и сложность в эксплуатации и обслуживании. Поэтому штабелёры пока остаются конкурентоспособными, т.к. представляют более простое и доступное решение. Таким образом, для узкопроходных складов оптимальным решением является использование высотных ричтраков, в остальных случаях штабелёр справляется с задачами не хуже.

Рассмотрим несколько высотных ричтраков и штабелёров (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение высотных ричтраков и штабелёров на примере четырех разных моделей техники

Параметры	Высотный штабелер LINDE L14 AP	Высотный штабелер STILL EXV-SF	Ричтрак JUNGHEINRICH ETV 216	Ричтрак JUNGHEINRICH ETV 216
Грузоподъемность, кг	1 400	1600	1600	1600
Высота подъема, м	10,5	12	12	11,5
Тип батареи	Li-ion	Li-ion	Свинцово-кислотная	Li-ion
Скорость передвижения, км/ч	6	6,5	10	9,5
Наличие выдвижных вил	Нет	Нет	Есть	Есть
Стоимость, млн руб.	4	4,5	6,5	6,7

Высотная складская техника – важное средство повышения эффективности работы современных складских систем. Ее применение позволяет максимально использовать пространство, увеличивать производительность труда, снижать издержки. Внедрение таких решений становится стратегически важным шагом для компаний, стремящихся сохранить конкурентоспособность в условиях растущих требований рынка.

Библиографический список

1. Гареева, А.М. Высотное стеллажное хранение: проблемы и особенности обеспечения пожарной безопасности. – Уфа: УГАТУ, 2022. – с. 209–212.
2. LINDE Material Handling – https: //www.linde-mh.com/.
3. STILL GmbH – https: //www.still.de/.
4. JUNGHEINRICH – https: //www.jungheinrich.com/.
5. BT (Toyota Material Handling) – https: //toyota-forklifts.eu/.
6. Волков, В. Высотный склад. Автоматизация внутренней логистики – 2008. https: //sitmag.ru/article/10597-vysotniy-sklad-avtomatizatsiya-vnutrenney-logistiki.

© Сабахов И.И., 2024

УДК 004.89

Д.А. СИНЧАК
dimasinchak@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В СФЕРЕ ЛОГИСТИКИ

Аннотация: в статье рассмотрены киберфизические системы (КФС) и их применение в логистике. Описывается, как КФС, объединяя физические процессы и цифровые технологии, способствуют развитию «умной логистики». В статье также анализируются достижения в рамках концепции «Индустрия 4.0», зарубежные примеры использования киберфизических систем, а также инновационные идеи, направленные на повышение устойчивости и экологичности логистики.
Ключевые слова: киберфизические системы; умная логистика; автоматизация; «Индустрия 4.0»; сенсоры; искусственный интеллект; устойчивость логистики.

Ключевым фактором для эффективной работы и стабильного функционирования различных сложных организационных структур является их постоянное и своевременное снабжение. Оно охватывает различные области, включая техническое, материальное (сырье), финансовое, информационное, вещевое, артиллерийское (например, боеприпасы), медицинское, продовольственное и другие виды ресурсов.

Эти задачи традиционно решаются с помощью логистических систем, однако в последние годы наблюдается рост интереса к развитию подсистем «умной логистики». Такие системы относятся к киберфизическим системам и обещают стать важной частью будущего. В данной статье рассматриваются основные принципы и методы функционирования этих инновационных технологий.

Киберфизические системы – это решения, которые интегрируют физические процессы и цифровые технологии для создания автономных, интеллектуальных и взаимодействующих систем управления. Они основываются на сочетании датчиков, исполнительных механизмов и алгоритмов обработки данных, что позволяет этим системам постоянно взаимодействовать с окружающей средой и принимать решения в реальном времени. Эти системы находят широкое применение в различных отраслях, таких как производство, медицина, транспорт и энергетика. Особенно большой потенциал киберфизические системы демонстрируют в логистике. В условиях глобализации и увеличивающихся требований к эффективности управления этапами поставок такие системы становятся значительным инструментом для автоматизации процессов, оптимизации ресурсов и улучшения управления логистическими операциями.

Достижение наивысшей производительности возможно через развитие направлений, связанных с новым технологическим укладом, который находит выражение в концепции «Индустрия 4.0». Эта концепция описывает четвертую промышленную революцию, основанную на цифровизации и автоматизации производственных процессов. В рамках «Индустрии 4.0» активно применяются такие технологии, как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект, большие данные и облачные вычисления. Сегодня эти технологии позволяют значительно ускорить сбор и обработку данных, что в свою очередь помогает снижать производственные издержки и повышать качество выпускаемой продукции. Это способствует росту производительности, развитию промышленности и трансформации трудовых ресурсов, что повышает конкурентоспособность как отдельных предприятий, так и целых стран. Существует два ключевых фактора, которые подтверждают необходимость перехода к «Индустрии 4.0» [1]:

1. Возможность интеграции и более эффективного управления глобальными цепочками поставок (от сырья до готового продукта).

2. Появление новых цифровых бизнес-моделей, предоставляющих потребителям значительную добавленную ценность за счет персонализированных решений.

Примеры реального применения киберфизических систем в области «умной логистики» включают технологии, которые оптимизируют логистические процессы за счет обеспечения обмена данными в реальном времени между промышленным, складским и транспортным оборудованием.

Эти системы интегрируют цепочки поставок, поставщиков, логистические управления и клиентов, значительно повышая эффективность процессов.

Для анализа перспектив внедрения киберфизических систем в деятельность промышленных предприятий России важно рассмотреть также зарубежный опыт. Один из ярких примеров проект виртуальной электростанции компании Toshiba. В рамках этого проекта используются технологии интернета вещей для координации распределенных источников энергии, таких как солнечная, водородная и ветровая, а также потребляющих энергию электротранспортных средств. Благодаря данным от IoT-устройств и современным технологиям компания смогла оптимизировать энергопотребление, прогнозировать его масштабы и добиться значительной экономии электроэнергии [8].

При анализе исследований, посвященных киберфизическим системам, можно выделить работу А.С. Кудрявцевой, которая предложила упрощенную схему функционирования таких систем. В своей работе она выделила ключевые характеристики, отличающие киберфизические системы от концепции «Интернет вещей». К таким характеристикам относятся:

– высокая степень координации и взаимодействия между физическими и вычислительными элементами;

– цифровая интеграция и распределенные коммуникации;

– возможность параллельного выполнения процессов;

– наличие потоков данных разного типа (восходящих, нисходящих, регулирующих) и др. [2].

Киберфизические системы в рамках «умной логистики» представляют собой интеграцию кибернетических подходов, аппаратного и программного обеспечения, а также современных логистических механизмов, способных реагировать на изменения в окружающей среде, обмениваться информацией, самообучаться и адаптироваться [9].

Примеры таких систем включают «умные дороги» с мониторингом состояния дорожного покрытия, единый диспетчерский центр системы «Платон», информационные табло о пробках и загруженности складов, «умные светофоры», в том числе работающие на солнечных батареях, и системы анализа транспортного потока, оснащенные дорожными датчиками и средствами фото- и видеофиксации [3, 4]. Кроме того, киберфизические решения в логистике включают внедрение динамических дорожных табло, видеоконтроля, электронных табло на складах и транзитных пунктах, а также системы контроля и управления электронными документами. Применяются технологии мобильной оплаты за поставки, беспилотный грузовой транспорт, дистанционный весовой контроль грузов, системы мониторинга транспортных потоков, а также инструменты для контроля соблюдения логистических и дорожных норм [5–7].

Для более инновационного подхода можно рассмотреть следующие идеи по применению киберфизических датчиков в логистике, которые

ориентируются на будущее технологий и их интеграцию с искусственным интеллектом, квантовыми вычислениями и экологическими инициативами:

1. «Умные» контейнеры с функцией самоуправления: оснащенные сенсорами контейнеры, способные самостоятельно выбирать маршруты и способ перемещения в зависимости от условий. Они могут передвигаться по автоматизированным транспортным системам, взаимодействовать с другими контейнерами и выбирать наиболее оптимальный путь к конечной точке.

2. Сенсорные сети для динамического мониторинга углеродного следа: датчики могут быть использованы для отслеживания углеродных выбросов в реальном времени на каждом этапе логистической цепочки. Это позволит оптимизировать использование транспорта с низким уровнем выбросов и улучшить устойчивость логистики.

3. Самообучающиеся сети киберфизических датчиков для динамической оптимизации складов. Разработка самообучающихся киберфизических систем, которые могут адаптировать расположение товаров на складах и перемещать грузы более эффективно с учетом меняющихся условий (например, изменяющегося спроса на продукты или неожиданных изменений в цепочке поставок).

Подытожив, можно сказать, что применение киберфизических систем в логистике открывает новые горизонты для повышения эффективности, автоматизации и устойчивости процессов. Благодаря интеграции датчиков, искусственного интеллекта и робототехники эти системы позволят в реальном времени отслеживать состояние грузов, транспортных средств и складских запасов, оптимизировать маршруты и ресурсы, а также обеспечить безопасность перевозок. Кроме того, инновационные решения, такие как использование квантовых сенсоров, самообучающиеся системы, обещают трансформировать логистику, сделав её более адаптивной, экологически чистой и персонализированной. В будущем это станет основой для создания полностью автоматизированных и интеллектуальных цепочек поставок, способных адаптироваться к быстро меняющимся условиям рынка и потребностям клиентов.

Библиографический список

1. Калашников, С.А., Отто, В.С., Конычева, Н.А. Перспективы развития цифровой индустрии в экономике России // Вопросы экономики и права. 2017. № 112. С. 25–28.

2. Кудрявцева, А.С. Киберфизическая система как развитие автоматизации на всех этапах жизненного цикла деятельности предприятия на основе внедрения цифровых технологий // Системный анализ в проектировании и управлении. 2019. №1 (13). С. 309–320.

3. Faulin, J., Grasman, S., Juan, A., Hirsch, P. Sustainable Transportation and Smart Logistics. Decision-Making Models and Solutions. 1st ed. Amsterdam: Netherlands: Elsevier, 2018. 534 p.

4. Kawa, A. SMART Logistics Chain. Intelligent Information and Data-base Systems: Proceedings of the 4th Asian conference on Intelligent Information and Database (ACIIDS2012), Kaohsiung, Taiwan, March 19–21, 2012. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. LNAI 7196, Part I. 2012. Pp. 432–438.

5. Николаев, В.П. Умные города – будущее сегодня. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.jetinfo.ru/stati/umnye-goroda-buduschee-segodnya (дата обращения: 26.10.2024).

6. Дмитриев, И.И., Кириллов, А.М., Умные дороги и Интеллектуальная транспортная система. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/2%2853%29/1_dmitriev_53.pdf (дата обращения: 27.10.2024).

7. Комаров, В.В., Гараган, С.А. О понятии «интеллектуальная транспортная система» // Автомобильная промышленность. 2012. № 5. С. 23–25. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-infrastruktury-sistemy-era-glonass-kak-osnovy-telematicheskih-transportnyh-sistem/viewer (дата обращения: 26.10.2024).

8. Киберфизические системы в современном мире. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://habr.com/en/companies/toshibarus/articles/438262/ (дата обращения: 26.10.2024).

9. Михайличенко, Н.В., Паращук, И.Б. Безопасность киберфизических систем типа «умная логистика» для автоматизированного управления снабжением // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 5. С. 32–38.

© Синчак Д.А., 2024

УДК 656

Л.В. СУЛЕЙМАНОВА
Liana2000_2011@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет наук и технологий

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Аннотация: рассмотрены проблемы управления дорожным движением и методы обеспечения его безопасности в современных городах. Наиболее перспективными методом решения проблем является применение

интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Рассмотрены технологии ИТС, задачи, решаемые ИТС.
Ключевые слова: транспорт; дорожная инфраструктура; интеллектуальные транспортные системы.

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) – это неотъемлемая часть современной инфраструктуры, которая шагает в ногу с развитием технологий. Они революционизируют управление дорожным движением, делая его более эффективным и безопасным для всех участников. ИТС обеспечивают возможность контроля и управления движением, способствуют созданию комфортной и безопасной среды для всех участников дорожного движения.

Интеллектуальные транспортные системы – это комплекс современного оборудования, включающий видеокамеры, датчики, передатчики, GPS-оборудование и другие средства сбора информации, а также информационных технологий для сбора, хранения и передачи информации [1].

ИТС решают вопросы управления дорожным движением, позволяя собирать и анализировать данные о состоянии дорог, плотности трафика, поведении водителей и многом другом. Эта информация помогает оптимизировать поток транспорта, уменьшить пробки, сократить время в пути и повысить эффективность дорожного движения в целом.

ИТС позволяют управлять дорожным движением, собирая информацию о пробках, авариях и погодных условиях в режиме реального времени. Камеры видеонаблюдения, расположенные на дорогах и перекрестках, непрерывно собирают данные с целью выявления участков с затруднениями и опасных участков на дорогах. «Умные светофоры» способны адаптироваться к дорожному движению путем корректировки задержки зеленого сигнала в зависимости от интенсивности движения, тем самым способствуют снижению вероятности заторовых ситуаций [2].

Одним из примеров применения ИТС для улучшения управления дорожным движением являются электронные табло и информационные панели на дорогах. Они предоставляют водителям актуальную информацию о текущем состоянии дорожного покрытия, наличии заторов, погодных условиях, что, в свою очередь, позволяет снизить аварийность и оптимизировать трафик.

Кроме того, ИТС облегчают внедрение интеллектуальных транспортных решений, таких как системы динамического определения маршрута, определения стоимости проезда и интеллектуального управления парковкой. Эти решения помогают более эффективно распределять трафик, сокращать время в пути и минимизировать воздействие на окружающую среду.

Одной из основных задач ИТС является повышение безопасности дорожного движения путем предотвращения дорожно-транспортных происшествий и сведения к минимуму их тяжести. ИТС достигает этого с помощью различных технологий и инициатив (рис. 1).

Развитие ИТС не стоит на месте, и с каждым годом появляются новые технологии и инновации, способные сделать дороги еще безопаснее и управляемые. Это включает в себя такие перспективные разработки, как автономные транспортные средства, интерактивные дорожные знаки, системы предотвращения усталости водителя и многое другое.

Расширение использования ИТС связано с тем, что они решают целый ряд транспортных городских задач (рис. 2).

Одним из важных факторов развития ИТС является их доступность и внедрение в общую транспортную систему. Эффективное функционирование интеллектуальных транспортных систем требует согласованной работы различных участников, включая государственные органы, частные компании и обычных пользователей.

Использование интеллектуальных транспортных систем также обладает экономическими преимуществами. Благодаря ИТС снижаются затраты на обслуживание дорог, уменьшаются расходы на топливо из-за оптимизации маршрутов, снижается аварийность, что в свою очередь снижает смертность на дорогах, затраты на ремонт элементов транспортной инфраструктуры и самих транспортных средств.



Рис. 1. Технологии ИТС

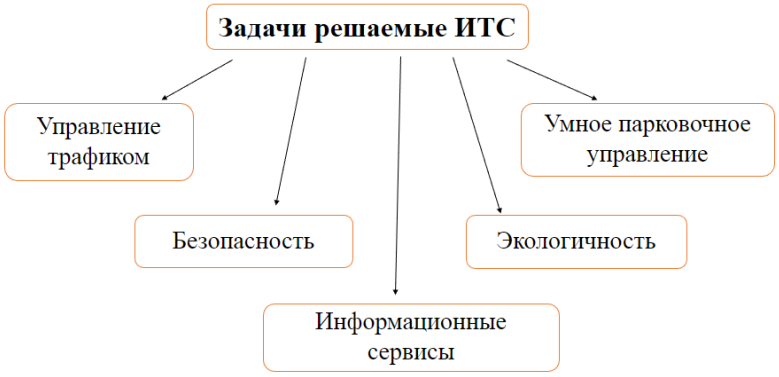


Рис. 2. Задачи решаемые ИТС

Благодаря оптимизации потока транспорта и снижению пробок уменьшаются выбросы вредных веществ в атмосферу, что положительно влияет на окружающую среду.

Интеллектуальные транспортные системы способны вывести вопросы управления дорожным движением и обеспечения безопасности дорожного движения на новый качественный уровень. С помощью технологий «больших данных» ИТС оптимизирует транспортный поток, уменьшает пробки и повышает безопасность дорожного движения для всех участников дорожного движения. Внедрение ИТС позволит повысить качество жизни в современных мегаполисах, способствовать созданию более «умных», безопасных городов будущего.

Библиографический список

1. Интеллектуальные транспортные системы [Электронный ресурс]: – Режим доступа: https://center2m.ru/intellektualnye-transportnye-sistemy (дата обращения 19.11.2024).

2. Интеллектуальная транспортная инфраструктура России [Электронный ресурс]: – https://www.tadviser.ru/a/308588 (дата обращения 19.11.2024).

3. Система помощи водителю ADAS [Электронный ресурс]: – Режим доступа: https://movon.pro/sistema-pomoshhi-voditelyu-adas / (дата обращения: 19.11.2024).

© Сулейманова Л.В., 2024

УДК 533.697.5

Г.И. ФАЙЗУЛЛИНА
gfaizyllina@yandex.ru
Науч. руководв. – доцент Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЭЖЕКТОРАХ

Аннотация: в данной работе представлена разработка численной модели для описания динамики двухфазного потока в эжекторе, используемом в нефтегазовых промышленных процессах. Модель основана на решении

уравнений Навье-Стокса с учетом взаимодействия газовой и жидкой фаз. Проведены численные эксперименты, позволяющие оценить влияние различных параметров на эффективность работы эжектора.
Ключевые слова: эжекторы; двухфазное течение; численная модель; уравнение Навье-Стокса; взаимодействие фаз.

Эжекторы, являющиеся важными устройствами в большинстве промышленных процессов, эффективно используют взаимодействие между высокоскоростным потоком газа и различными жидкостями для создания вакуума или перемещения жидкости. В условиях эксплуатации с двухфазным потоком (жидкость и газ) возникают сложные динамические процессы, требующие точного и надежного моделирования для повышения эффективности работы. Для оптимизации работы эжекторов и повышения их эффективности необходимо глубокое понимание динамики двухфазных течений. Современные методы математического моделирования играют ключевую роль в этом процессе. В данной статье рассматриваются основные методы моделирования двухфазных течений, их преимущества и недостатки, а также примеры применения этих методов в практических условиях.

Существует несколько основных подходов к моделированию двухфазных течений. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

1. Модель Эйлера-Эйлера. В этой модели обе фазы рассматриваются как непрерывные среды. Основные уравнения, используемые в модельном подходе, основаны на законах сохранения массы, импульса и энергии для каждой фазы. Взаимодействие между фазами моделируется с помощью дополнительных уравнений, учитывающих обмен моментом и энергией.

Основным преимуществом данной модели является способность описывать сложные системы с большим числом компонент и высокая степень детализации в определении потоковых характеристик.

К недостаткам можно отнести сложность вычислений, что может потребовать значительных ресурсов и необходимость в точной настройке модели, что может привести к расчетным ошибкам.

2. Модель Эйлера-Лагранжа. Данный метод используется для описания дискретной фазы, такой как пузырьки газа или капли жидкости, в основном

потоке. Элементы дискретной фазы описываются отдельными уравнениями, что позволяет учитывать их взаимодействие с непрерывной фазой.

Преимущества модели позволяют более точно анализировать поведение дисперсных частиц и способствуют детальному изучению процессов переноса и взаимодействия частиц.

Недостатки включают в себя ограниченную применимость при высокой концентрации дисперсной фазы и необходимость моделирования больших чисел частиц, что может затруднить вычислительный процесс.

3. Модель сетевого потока. Недавние исследования также начали использовать сетевые модели для описания двухфазных течений. В этом подходе используются сети труб и каналов, что позволяет оценивать взаимодействия между потоками на глобальном уровне.

Преимуществами данной модели являются высокая скорость моделирования и простота реализации, а также меньшая вычислительная нагрузка по сравнению с традиционными методами.

К недостаткам можно отнести один фактор, и это ограниченная точность результатов, особенно в сложных системах.

Сравнение различных методов моделирования двухфазных течений должно учитывать множество факторов:

1. Сложность геометрии: для сложных форм эжекторов эффективней использовать модель Эйлера-Эйлера.

2. Концентрация дисперсной фазы: в системах с низким содержанием дисперсии рекомендуется использовать модель Эйлера-Лагранжа.

3. Требования к точности: для задач с высоким уровнем детальности необходимы комплексные модели с учетом всех факторов влияния.

К примерам практического применения можно отнести:

– химическую промышленность; модели Эйлера-Эйлера часто используются для предсказания характеристики смешивания в реакторах при различных условиях;

– энергетику; модели Эйлера-Лагранжа применяются для анализа процессов сжижения газа и взаимодействия с каплями форсунок;

– экологические исследования: модели сетевого потока оказались полезными для анализа распространения загрязняющих веществ в водоемах.

Сравнительный анализ методов моделирования двухфазных течений в эжекторах ясно демонстрирует, что выбор подхода зависит от конкретных условий задачи. Понимание характеристик каждого метода и применение правильной модели позволяют значительно улучшить проектирование и оптимизацию эжекторов, что, в свою очередь, может привести к повышению их эффективности в промышленных процессах.

Библиографический список

1. Петров, В.Н., Сопин, В.Ф., Малышев, С.Л., Петров, С.В. Математическое моделирование процесса перемешивания спутных двухфазных потоков в цилиндрическом канале / В.Н. Петров, В.Ф. Сопин, С.Л. Малышев, С.В. Петров // Вестник технологического университета. 2016. – № 20. – с. 147–151.
2. Цечоева, Л.А. Численное моделирование двухфазных потоков / Л.А. Цечоева // ООО «ОМЕГА САЙНС». 2021. – с. 80–86.
3. Лебедев, Б.Н., Зайцев, С.В. Анализ методов моделирования в динамике двухфазных потоков / Б.Н. Лебедев, С.В. Зайцев / Теплотехника. 2022. – № 60 (5). – с. 85–92.
4. Попов, И.М., Цветкова, Е.А. Эффективность применения моделей сетевого потока в эжекторах / И.М. Попов, Е.А. Цветкова // Журнал гидравлики. 2023. – № 29 (2). – с. 24–36.

© Файзуллина Г.И., 2024

УДК 656.211.3

Д.А. ХАЙДАРОВ
dhaydarov98@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ОБЗОР ИНТЕГРАЦИИ ГОРОДСКОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СООБЩЕНИЯ В ГОРОДСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ ГОРОДОВ-МИЛЛИОНЕРОВ РОССИИ БЕЗ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

Аннотация: изучена обеспеченность пересадочной инфраструктурой городских и ближних пригородных железнодорожных станций в городах-миллионерах России, не имеющих систем метрополитена. Проанализировано расписание движения пригородных поездов в радиусе часа пути от главных вокзалов городов. Сопоставлены показатели изучаемых городов.
Ключевые слова: железнодорожное пассажирское сообщение; городские агломерации; транспортно-пересадочные узлы; транспортная инфраструктура.

Вопрос обеспеченности городов общественным транспортом является одним из наиболее остро стоящих вопросов инфраструктурной обеспеченности для большинства российских городов-миллионеров. В особенности же остро данный вопрос стоит в городах, имеющих слабую обеспеченность транспортом, обособленных от автодорожной сети. Вместе с этим, в подавляющем большинстве крупных городов РФ, как с населением более миллиона человек, так и менее, использование возможностей проходящей по территории города

железнодорожной сети в целях внутригородского сообщения является далёким от максимального [2, 3].

Среди городов-миллионеров России действующих систем метрополитена или метротрама не имеют (в порядке убывания численности населения) такие города как Красноярск, Челябинск, Уфа, Ростов-на-Дону, Краснодар, Омск, Воронеж, Пермь. Для рассмотрения текущего положения сети железнодорожного транспорта в роли городского взяты используемые в пассажирском сообщении станции, располагающиеся в пределах около часа следования в пути от городских вокзалов, как уже существующих пересадочных узлов, соединяющих железную дорогу и городскую транспортную систему. Каждая сеть городской и пригородной железной дороги оценивается по пяти критериям: доля станций с наличием остановочного пункта массового городского транспорта; доля станций с наличием парковки park-and-ride; максимальный интервал движения вне ночного времени (продолжительность дневного технологического перерыва); средний интервал движения в дневное время; общее время движения. Радиус в виде часа пути выбран как предельно актуальный для ежедневных перемещений [4]. Также за рамками данной статьи остаётся вопрос состояния и комфортности пешеходной инфраструктуры в непосредственной близости от станций. Однако, рассмотрение отдельных станций в каждом из исследуемых городов создаёт эмпирическое впечатление о том, что состояние подходных путей к платформам железнодорожных станций является одним из факторов, ограничивающих использование железной дороги в городе, а также существование пристанционного пространства как общественного [5].

На первом этапе был проведён выбор рассматриваемых станций. В табл. 1 приведены «пограничные» станции каждого из городов и, в связи с невозможностью перечислить все поимённо, количество рассмотренных станций, попадающих в выбранный радиус. В выборку не попадали главные вокзалы самих городов, так как все вокзалы в рассматриваемых городах имеют необходимую пересадочную инфраструктуру. Всего было изучено 394 железнодорожные станции.

Таблица 1

Выборка станций для исследования

Город	«Пограничные» станции	Количество станций
Красноярск	Еловка, Дивногорск, Зыково, Красноярск-Северный	42
Челябинск	Ессаульская, Разъезд №6, Ванюши, Тактыбай, Клубника, Еманжелинск	60
Уфа	Чишмы-1, Карламан, Тавтиманово	42

Окончание таблицы 1

Ростов-на-Дону	Мержаново, Красный Маяк, Пчеловодная, Азов, 1387 км,	67
Краснодар	Мышастовка, Пластуновская, Васюринская, Ильская, Псекупс	51
Омск	Марионовка, 2666 км, Новоселецк, Кормиловка	44
Воронеж	Латная, Графская, Аношкино	35
Пермь	Краснокамск, Чайковская, Славянова, Бобки, Янычи, Казарма 30 км	53

При оценке инфраструктурно-интеграционных показателей, таких как наличие остановки массового городского транспорта (МГТ), наличие парковки park-and-ride, с целью отражения разнообразия размещения инфраструктуры были приняты следующие критерии, отражённые в табл. 2.

Таблица 2

Критерии оценки наличия транспортно-пересадочных объектов

Тип объекта	Оценка	
	0,5	1
Остановки МГТ	Используемая общественным транспортом остановка в радиусе 500 метров ходьбы от станции	Используемая общественным транспортом остановка в радиусе 200 метров ходьбы от станции
Парковки park-and-ride	Парковка в пределах 500 метров ходьбы с преимущественным использованием коммерческой или жилой недвижимостью в зоне досягаемости	Целенаправленно организованная парковка; наличие парковки с низким потенциалом использования в других целях в пределах 500 метров ходьбы

Расстояние в 200 метров для остановок выбрано по причине того, что железная дорога в сложившейся практике, как правило, значительно отчуждена от активной городской застройки, и её использование в качестве городской системы требует мультимодальности в виде подвоза пассажиров массовым городским транспортом. В таком случае более дальнее расстояние до пересадки в совокупности с интервалами движения городского транспорта делает опыт использования любых проектов городского железнодорожного сообщения менее привлекательным, чем любые возможные альтернативы. В особенности это актуально в холодные сезоны, которые не только длятся значительную часть года в большинстве рассматриваемых городов, но и являются периодом наибольшего спроса как на транспортную систему города как таковую, так и на

массовый городской транспорт. Вместе с этим, планировка железнодорожных станций и прилегающей территории зачастую не позволяет располагать остановки достаточно близко, но их расположение всё равно позволяет реализовать пересадку с одного вида транспорта на другой. Для парковок, в связи с их более обширной площадью, заведомо рассматривается радиус в 500 метров. При этом в ходе изучения было обнаружено значительное количество парковок возле станций, которые используются коммерческими или жилыми объектами, и существует высокая вероятность отсутствия свободных мест для потенциальных пассажиров поездов. Для получения результирующего показателя для каждого города бралось среднее арифметическое значение по всем станциям города. Для наглядности они приведены в табл. 3 в процентах. Также, для получения единого общего показателя по обеспеченности станций пересадочными объектами для каждой станции было взято среднее арифметическое из оценки наличия остановки и оценки наличия парковки, а затем взято среднее значение по всем станциям города.

Для получения данных о максимальном дневном интервале, среднем интервале в течение периода обслуживания и полном периоде обслуживания были изучены данные по всем станциям согласно расписанию пригородных электропоездов. Затем, для получения оценки общегородской системы, было взято медианное значение каждого показателя для всех станций города. Также, было подсчитано фактическое время обслуживания (полный период за вычетом дневного перерыва).

Таблица 3

Оценка наличия пересадочных объектов

Город	Объекты		
	Остановки	Парковки	Всего
Красноярск	39.29%	52.38%	45.83%
Челябинск	30.00%	18.33%	24.17%
Уфа	16.67%	20.24%	18.45%
Ростов-на-Дону	29.41%	17.65%	23.88%
Краснодар	28.43%	28.43%	28.43%
Омск	15.91%	14.77%	15.34%
Воронеж	57.14%	34.29%	45.71%
Пермь	38.68%	25.47%	32.08%

Таблица 4

Временные показатели движения

Город	Дневной перерыв, мин	Средний интервал движения, мин	Полный период обслуживания, ч	Время обслуживания, ч	Эффективное время обслуживания, ч
Красноярск	293	110	14.7	9.8	5.34
Челябинск	732	700	12.3	0.1	0.01
Уфа	245	121	14.2	10.2	5.06
Ростов-на-Дону	400	169	14.0	7.3	2.59
Краснодар	390	177	13.5	7.0	2.38
Омск	530	327	11.4	2.5	0.46
Воронеж	289	133	14.6	9.7	4.41
Пермь	306	165	14.8	9.7	3.54

В заключение, для учёта времени обслуживания и интервала движения в едином количественном показателе, было вычислено эффективное время обслуживания как отношение времени обслуживания к среднему интервалу движения. Результаты приведены в табл. 4 (см. выше).

На рис. 1 приведено расположение рассматриваемых городов в зависимости от их обеспеченности инфраструктурой и эффективного времени обслуживания.

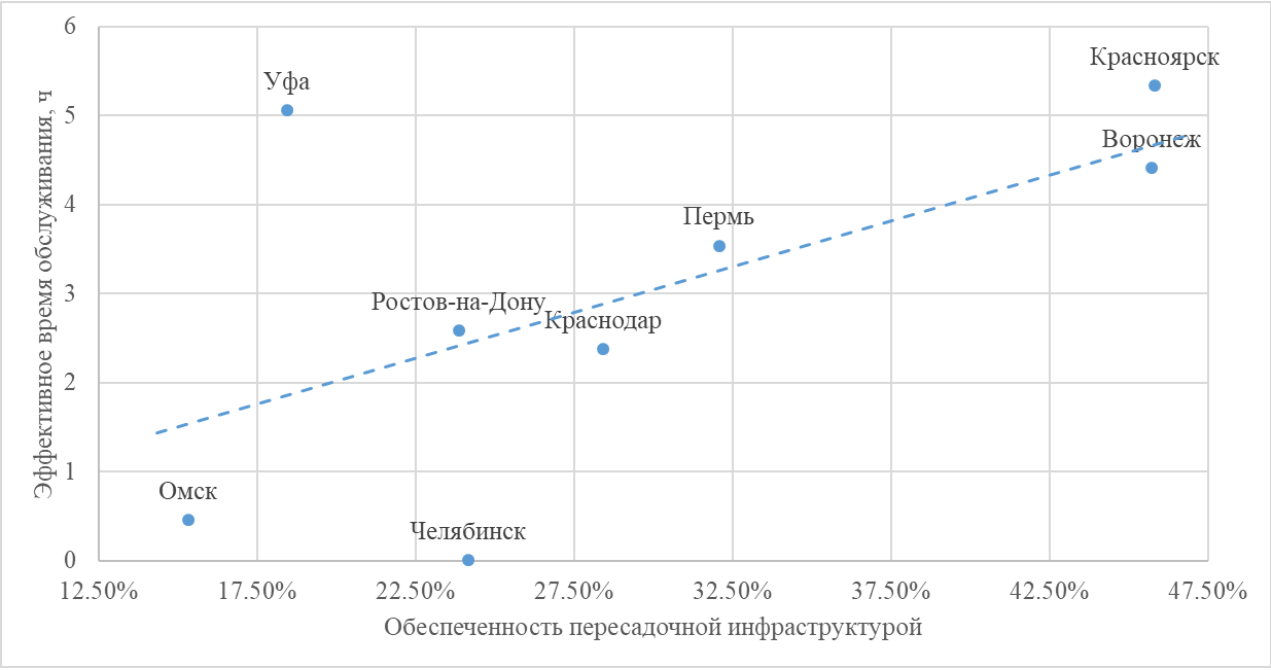


Рис. 1. Диаграмма городов по обеспеченности инфраструктурой и эффективному времени обслуживания

Подводя итог полученным результатам можно заметить, что лучшие показатели интегрированности и частоты сообщения наблюдаются в Красноярске и Воронеже, городах, имеющих общую проблему поддержания сообщения между двумя берегами реки, разделяющей города на относительно равные части. В остальных городах, оказавшихся выше линии тренда, проходящая через город железная дорога также способна предоставить дополнительную ёмкость транспортной системы по напряжённым направлениям. Важными аспектами дальнейшего исследования, не затронутыми в данной статье, видятся анализ железнодорожных веток в общей маршрутной сети городов, связь интеграционных показателей с пассажиропотоками, организацией перевозок в городе и тем, как устроено управление транспортом в городах и регионах.

Библиографический список

1. Зубец, А.Ж. Анализ обеспеченности городов-миллионников России транспортной инфраструктурой // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. – 2016. – № 2 (17). – С. 54.

2. Килина, Е.Ф., Кукина, И.В., Липовка, А.Ю. Принципы создания модели развития системы электрического транспорта в городской среде (на примере города Красноярск) // Известия КГАСУ. – 2019. – № 1 (47). – С. 109.

3. Меркушев, С.А. Железнодорожное пассажирское сообщение в российских городах-миллионерах: масштабы, специфика, возможности преобразования городской среды. // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 3 (58). С. 21–37. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-3-21-37.

4. Дьячкова, П.А., Мосиенко, Н.Л. Анализ маятниковых миграций в городской агломерации: социологические опросы и большие данные // Мир экономики и управления. 2021. Т. 21, № 4. С. 205–228. DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-4-205-228.

5. В кольце железных дорог // ardexpert.ru: Строительный эксперт, Портал для специалистов архитектурно-строительной отрасли. URL: https: //ardexpert.ru/article/1447 (дата обращения: 20.11.2024).

© Хайдаров Д.А., 2024

УДК 621.313

Е.А. ХАЙРУЛЛИНА
tweenboom24@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ
Уфимский университет науки и технологий

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МУСОРОВОЗЫ

Аннотация: в статье рассматривается сравнение типов электрических мусоровозов, выявлены преимущества и недостатки. Представлены результаты

стран и городов, которые полностью или частично заменили автопарк традиционных мусоровозов на электрические. Указаны будущие тенденции развития данной отрасли.
Ключевые слова: электрические мусоровозы; гибридные мусоровозы; экология; аккумуляторные технологии; расширение зарядной инфраструктуры.

Роль переработки отходов в современном мире имеет ключевое значение. Такие методы как захоронение и сжигание загрязняют окружающую среду и истощают природные ресурсы. Фокусирование на сокращении, повторном использовании и переработке отходов приводит к значительным преимуществам, таким как снижение выбросов парниковых газов, сохранение природных ресурсов, таких как вода, леса и энергия, создание рабочих мест в сфере переработки и повторного использования.

Электрические мусоровозы актуальны в данной теме и имеют ряд преимуществ:

– электрические мусоровозы не выделяют выбросов при работе, что благоприятно влияет на уменьшение загрязнения окружающей среды;

– электрические мусоровозы работают тише, чем дизельные мусоровозы, уменьшая при этом уровень шумового загрязнения в городах;

– электрические мусоровозы используют электричество вместо дизеля, что приводит к существенной экономии на расходах на топливо;

– электрические мусоровозы имеют менее сложную конструкцию, чем традиционные мусоровозы, это приводит к тому, что затраты на техническое обслуживание и ремонт меньше;

– многие страны предлагают налоговые льготы и субсидии для компаний, инвестирующих в электрические мусоровозы.

Существует два основных типа электрических мусоровозов:

1. Полностью электрические мусоровозы: работают исключительно на электроэнергии, хранящейся в аккумуляторных батареях. Не производят выбросов выхлопных газов. Имеют больший запас хода и более высокую грузоподъемность, чем гибридные мусоровозы.

2. Гибридные мусоровозы: сочетают в себе как электрический, так и дизельный двигатель. Электрический двигатель используется для привода мусоровозного кузова, а дизельный двигатель питает шасси грузовика. Имеют более низкие выбросы, чем традиционные мусоровозы, но по-прежнему производят некоторое количество выбросов выхлопных газов [1].

Полностью электрические мусоровозы более экологичны и имеют более низкие эксплуатационные расходы, но они дороже в приобретении. Гибридные

мусоровозы предлагают компромисс между экологическими преимуществами и стоимостью [2].

Технические характеристики и производительность электрических мусоровозов:

1. Полностью электрические мусоровозы:

– запас хода до 160 км на одной зарядке;
– грузоподъемность до 10 тонн;
– скорость до 80 км/ч;
– время зарядки от 4 до 8 часов в зависимости от типа зарядного устройства.

2. Гибридные мусоровозы:

– запас хода в электрическом режиме до 50 км;
– грузоподъемность до 8 тонн;
– скорость до 70 км/ч;
– время зарядки от 2 до 4 часов.

Благодаря высокому запасу хода полностью электрические мусоровозы являются подходящими для маршрутов с большим расстоянием. А гибридные мусоровозы являются более универсальными и подходящими для маршрутов с различными условиями эксплуатации благодаря тому, что они в любой момент могут переключиться на дизельный двигатель для питания шасси грузовика.

Эффективность электрических мусоровозов выше благодаря высокому КПД электрического двигателя. Кроме этого, они используют рекуперативное торможение для зарядки аккумуляторов во время замедления.

Конструкция электрических и дизельных мусоровозов достаточно схожая. Это приводит к более высокой надежности и меньшим затратам на техническое обслуживание. В целом электрические мусоровозы имеют много плюсов по технической части по сравнению с традиционными мусоровозами, включая более высокую эффективность, надежность и экологичность.

Зарубежные города и муниципалитеты, использующие электрические мусоровозы:

1. Сан-Франциско, Калифорния. Сан-Франциско стал первым крупным городом в США, который полностью перешел на электрические мусоровозы в 2022 году. Городской парк из 75 электрических мусоровозов ежегодно экономит около 600000 галлонов дизельного топлива и сокращает выбросы углерода на 20%.

2. Сиэтл, Вашингтон. Сиэтл использует электрические мусоровозы с 2019 года. Городской парк из 23 электрических мусоровозов сократил выбросы углерода на 1200 метрических тонн в год.

3. Ванкувер, Канада. Ванкувер использует электрические мусоровозы с 2020 года. Городской парк из 10 электрических мусоровозов сократил выбросы углерода на 250 метрических тонн в год.

4. Осло, Норвегия. Осло использует электрические мусоровозы с 2018 года. Городской парк из 62 электрических мусоровозов полностью электрифицирован и не производит выбросов выхлопных газов.

5. Лондон, Великобритания. Лондон использует электрические мусоровозы с 2021 года. Городской парк из 23 электрических мусоровозов сократил выбросы углерода на 1000 метрических тонн в год.

Отечественный опыт внедрения электрического мусоровоза:

1. В октябре 2023 года по маршруту Миасс–Златоуст вышел в рейс мусоровоз, работающий на электрической тяге. Он благополучно проехал 100 км на высокогорном участке трассы М5.

Конструкция мусоровоза была разработана в Южно-Уральском государственном университете. Предварительно ученые изучали цикл работы мусорщиков в Челябинске, собирали данные по времени в пути и остановкам, а также километражу и маршруту.

После анализа собранных данных были рассчитаны требуемые характеристики электродвигателя. На следующем этапе исследований планируется разместить двигатель внутри автомобиля. Программа управления тягловым электрооборудованием разработана учеными ЮУрГУ совместно с компанией «Канопус». После испытаний мусоровозы будут выпускаться на заводе «Урал».

Технически мусоровоз является гибридом, т.к. имеет более одного источника энергии. Планируется, что внутри городов мусоровоз будет ездить на электричестве, а за городской чертой использовать обычный двигатель сгорания. При работе электрического двигателя максимальная скорость мусоровоза 60 км/ч.

2. В июне 2020 года «КамАЗ» выпустил электрический мусоровоз под названием «КамАЗ-Чистогор». Характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики «КамАЗ-Чистогор»

Колёсная формула	4x2
Грузоподъёмность шасси	12 тонн
Грузоподъёмность мусоровоза	6 тонн
Полная масса	19,5 тонн
Максимальная скорость	90 км/час
Ёмкость тяговой аккумуляторной батареи	156,6 кВт·ч

Заряда при полной массе автомобиля с учетом работы надстройки на прессование мусора хватает на 100 километров. Благодаря такому запасу хода на одной зарядке осуществляется не менее двух циклов сбора и выгрузки мусора. Одно из преимуществ мусоровоза снижение уровня шума. Это позволяет проводить уборку твердых коммунальных отходов в ночное время, когда на дорогах нет пробок, и не беспокоить горожан.

Грузовик имеет систему помощи водителю ADAS третьего уровня класса City Pilot (полуавтономный режим автомобиля), разработанную специалистами Научно-технического центра «КамАЗа». Как отмечает главный конструктор, водитель выполняет роль оператора-контролера и лишь иногда вмешивается в процесс движения грузовика.

Повышение спроса на электрические мусоровозы с каждым годом будет только расти, связано это в первую очередь с сохранением экологии. Использование электрических мусоровозов также может способствовать сокращению шумового загрязнения и улучшению качества воздуха. Кроме того, переход на экологически чистые методы управления отходами может стимулировать инновации и создать новые рабочие места в сфере зеленых технологий. Инвестиции в электрические мусоровозы и сопутствующую инфраструктуру могут способствовать росту экономики и созданию новых рабочих мест в области производства, установки и обслуживания.

Библиографический список

1. Электрические, водородные и гибридные мусоровозы: европейский и отечественный опыт [Электронный ресурс]. URL: https://exkavator.ru/road-construction/news/inf_news/140431_elektricheskie_vodorodnie_i_gibridnie_musorovozi_evropeyskiy_i_otechestvenniy_opit.html (17.05.2024).

2. Сравнение электрических и гибридных мусоровозов [Электронный ресурс]. URL: https://panor.ru/articles/gibridnyy-musorovoz-na-elektricheskoy-tyage/100429.html# (17.05.2024).

3. Будущие перспективы и тенденции электрических мусоровозов [Электронный ресурс]. URL: https://www.ng.ru/energy/2018-02-13/12_7171_electriccar.html (17.05.2024).

© Хайруллина Е.А., 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1.1. Конструкция, производство и техническая эксплуатация летательных аппаратов ……..……..…...….. 3
Антропов Н.А. Вертолет с гибридной силовой установкой, область применения и преимущества……...……..…… 3
Батманов А.С. Установка крыла на вертолет МИ-26 ……..…. 7
Бирюков Н.А. Карданный узел крепления механизма привода реверсивного устройства авиационного газотурбинного двигателя…..... 11
Галиахметова Л.М. Применение инновационных 3D технологий в авиационном производстве ……. 17
Галиева Э.М. Оценка ресурса трубопроводов функциональной системы авиационных ГТД и способы его повышения ……..……..... 22
Есина А.В. Установка крыла на вертолет МИ-26……. 27
Салаватова А.М. Втулка рулевого винта типа фенестрон ……...……... 31
Хисамитдинова Ю.Г. Способ сборки фюзеляжа…….….. 36
Цыпаев Н.Д. Диагностика газотурбинного двигателя по термгазодинамическим параметрам ……..…..... 41
Шарафутдинов Д.Р. Применение композиционных материалов при изготовлении лонжеронов несущего винта……...……...…. 44
Секция 1.2. Двигатели летательных аппаратов ..……..... 49
Иванов Н.Е. Регулируемое сопло наружного контура…….…. 49
Карякин К.А. Расчет распределения температуры вдоль секции жаровой трубы с учетом охлаждения …….……...……... 57
Ахтямов Р.Р. Верификация диаграмм Смита для компрессоров ……..…. 62
Байбурдин В.Н., Ханмурзин А.Д. Анализ влияния места расположения теплообменника-испарителя на термодинамические параметры ГТД на водородном топливе ……...……..….. 67
Касьянов С.А. Проектирование литого промежуточного корпуса ……. 72
Лукин Ю.М. Применение детонационного сжигания топлива в ГТД ..….. 78
Мухарямов И.Г. Упруго-демпферные опоры ……...…. 82
Невоструев И.Г. Исследование влияния жаростойких покрытий на ресурс рабочих лопаток турбин ……..... 89
Солдатов Т.В., Гайнанов И.А. Сравнительный анализ характеристик плоского и круглого сопла для ТРД с использованием ANSYS FLUENT... 96
Стяжкин А.О. Численное имитационное моделирование течений в соплах Лаваля с косым срезом в двумерной постановке ……...….. 100
Субханкулов Т.Р. Адаптивный авиационный двигатель ……...… 104
Сырлыбаев А.Р. Применение стримерного СВЧ-разряда для воспламенения топливной смеси ракетного двигателя ……..…… 109
Хаматнуров Ф.Р. Моделирование двигателя для высотного дозвукового разведчика М-55 «Геофизика» с использованием системы поддержки принятия решений «АМ» ……...… 120

Чегодаева П.Д. Методики оценки эффективности пленочного охлаждения секции ЖТ КС АЛ-31ст ……..……..……..……..…...…… 127
Секция 1.3. Прикладная теплотехника и энергетика …..…….. 134
Ахметшин А.А. Исследование изменения геометрии основной камеры сгорания …… 134
Белоножкова А.С. Устойчивое развитие ветроэнергетики: новейшие технологии для чистого будущего ……. 138
Бикмухаметова Е.Э. Экологическое влияние ГТУ на окружающую среду…….. 141
Бодров Е.С. Электрогенераторы: обзор и сравнительный анализ в современных исследованиях …….. 145
Бодров Н.С. Развитие и новшества ветроэнергетики …….. 148
Каримов Р.Д., Горбунов А.С., Газетдинов И.Р., Калашников Д.С. Применение многофазной конструкции генератора в ветроэнергетических установках ..... …… 150
Генералов А.Д., Нугаев П.А. Ракета на базе РД-300 для соревнований ВИШ25. Оптимизация и обоснование конструкции ……..…..... 154
Достовалов Н.С. Тенденции и проблемы развития беспилотных летательных аппаратов ……..……..... 160
Кильдияров И.К. Ветроэнергетические системы ……...….. 164
Клименко А.Ю., Горбунов А.С., Каримов Р.Д. Выбор регулируемого привода для объектов теплоэнергетики и ветроэнергетики ……..... 167
Каримов Р.Д., Мустафин Г.О. Магнитные муфты. Аналитический расчет магнитных муфт …….. 173
Насыров Д.А. Сравнение инженерных решений при создании ракет-носителей ……...…….. 176
Садртдинов Р.Р. Система спасения ракеты для соревнований ВИШ25. Оптимизация и обоснование конструкции ……...…… 182
Хафизов Р.Р. Газодинамический расчет ступени свободной турбины и теоретический способ повышения КПД ……... 188
Нугаев П.А., Генералов А.Д. Ракета на базе РД-100 для соревнований ВИШ25. Оптимизация и обоснование конструкции ……..……. 194
Томина Д.А. Оценка влияния способа подачи СПГ в ГТУ на параметры эффективности работы ……...…… 199
Меньшиков А.В. Ракета на базе H500-LW для соревнований ВИШ25. Оптимизация и обоснование конструкции ……...… 204
Секция 1.4. Тепловые двигатели ……...……. 211
Тиников А.Р., Асадуллин Б.И. Расчет рестрикторной шайбы для болида класса «FORMULA STUDENT» ……...…. 211
Ахунов В.О. Система EGR ……...…... 213
Идрисов Д.Ф. Моделирование двухтактного двигателя на авиационном керосине ……...…… 218

Ильбактин И.У., Салатов Н.И. Улучшение характеристик двигателя YAMAHA XJ6N путем внедрения турбонаддува ……...….. 221
Ильницкий К.А. Расчет потребления топлива автомобиля с гибридной силовой установкой ……. 227
Маматов Т.Ф. Проектирование топливной аппаратуры для двухтактного двигателя, работающего на авиационном керосине ……..….. 233
Матешук М.И. Двигатель для бензоэлектрогенератора …….. 236
Муравьев Д.Ю. Проектирование масляного насоса героторного типа ….. 240
Мухаметов В.Р. Моделирование трения и изнашивания в цилиндропоршневой группе ДВС ……...…….. 244
Некрасов П.Л. Проектирование форсунки с электромагнитным управлением и его компоновка в головке двигателя работающего на авиационном керосине …… 250
Усманов Ш.М. Моделирование износа поршневой-канавки с керамическим покрытием …… 253
Хасанов Д.В. Моделирование износа МДО-слоя на юбке поршня ……..... 257
Шакирьянов Р.Р. Исследование влияния пористости на теплопроводность МДО покрытия ……...……. 261
Шангареев Л.А. Исследование влияния керамического покрытия на тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы ДВС …...……. 267
Секция 1.5. Современные проблемы теоретической и прикладной механики ……...…….. 271
Гайнанов И.А. Применение автоматизированной системы для расчета сеансов связи космического аппарата с наземной станцией ……... 271
Адемсон М. К вопросу об уравнениях движения по брахистохроне …..… 275
Исянбаев Т.М., Кашапов А.М., Лутфуллин И.Ф. Обзор средств компьютерной алгебры при вычислении некоторых величин в статике ... 280
Секция 1.6. Прикладная гидромеханика и транспортная логистика.. 283
Алексеев В.Е. Расчет статистических и динамических характеристик регулятора мощности насоса……...…… 283
Бикмаева Д.С., Рахимова А.Р. Аварийная гидравлическая система гражданского самолёта ……...… 289
Бикмаева Д.С., Рахимова А.Р. Универсальный бурильный комплекс ...…. 293
Газизова Д.И., Павлова В.С. Форвардер – спецмашина для транспортировки лесозаготовок ……. 295
Газизова Д.И. Перспективы развития лесозаготовительной техники типа «харвестер» …….. 301
Газизова Д.И., Константинов С.Ю., Павлова В.С. Анализ методов борьбы с гидравлическим ударом ……...…... 304
Гареев Р.Н. Гусеничный мини-погрузчик ……...…….. 310
Гареев Р.Р. Рулевой привод руля высоты гражданского самолёта ……..… 314
Грачев А.О., Мукминов Д.Ф. Микрогидравлика в применении и в производстве …… 318

Грачев А.О., Мукминов Д.Ф. Протезы нижних конечностей с применением микрогидравлических систем ……..…….…… 321
Дергачев И.А. Методика моделирования рулевого привода внешнего элерона гражданского самолета ……...…… 325
Дмитриенко Д.А. Российско-китайское сотрудничество в сфере грузовых перевозок ……...…….. 330
Долгополов И.В. Гидропривод дорожной фрезы ……..…… 336
Иванов А.А. Автономный электрогидравлический рулевой привод летательного аппарата……..…….……..…….…….. 341
Карпусь Д.А. Одноковшовый полноповоротный экскалатор……... 346
Колпаков А.А. VEHICLE-TO-VEHICLE (V2V) И VEHICLE-TO-INFRUSTRUCTURE (V2I) в рамках управления грузовыми перевозками 348
Коробов К.И. Автоматизированная система управления гидравлической трансмиссии гусеничного двухзвенного вездехода ……..…….. 352
Лукьянчиков К.И. Концепция «умный автомобиль» ……..…. 356
Мамыкин О.П., Садыков Т.Х. Моделирование динамических характеристик электрогидроусилителя рулевого привода руля направления гражданского самолёта……..……..……..…….. 360
Мамыкин О.П., Садыков Т.Х. Применение регулятора расхода в гидросистемах ……. 366
Манукян Р.Г. Анализ конструктивных особенностей установок разведочного бурения отечественного производства …… 371
Марков Н.А., Мурзагулова А.Р. Автономный рулевой привод самолета 377
Марков Н.А., Мурзагулова А.Р. Гидравлическая система гусеничного асфальтоукладчика …….. 382
Минигулова Д.А., Гидросистема шагающего колесного экскаватора ……. 388
Мусин Р.А. Плазменные генераторы электроэнергии ……..… 392
Мухамадуллина А.Р. Гидравлическая система гусеничного погрузчика 396
Надыргулова Т.И. Влияние мостового перехода на дорожную ситуацию на въезде в г. Уфа в рамках проекта «Южные ворота» ……..……. 399
Павлова В.С. Грузовой квадрокоптер с гидравлическим приводом ……... 404
Паньков К.А. Гусеничный вездеход с навесным оборудованием …..……. 406
Сабахов И.И. Высотная складская техника как средство повышения эффективности работы склада ……...…… 410
Синчак Д.А. Киберфизические системы в сфере логистики ……..……. 413
Сулейманова Л.В. Интеллектуальные транспортные системы ……..…… 417
Файзуллина Г.И. Сравнительный анализ методов моделирования двухфазных течений в эжекторах ……...…… 420
Хайдаров Д.А. Обзор интеграции городского железнодорожного сообщения в городские транспортные системы городов-миллионеров России без метрополитенов …… 423
Хайруллина Е.А. Электрические мусоровозы ……..……. 428

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat − текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Научное издание

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 1

Материалы
XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции

(г. Уфа, 25 – 29 ноября 2024 г.)

Электронное издание сетевого доступа

За достоверность информации, изложенной в статьях,
ответственность несут авторы.
Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 26.09.2025 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 27,77 Мб.
Заказ 145.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: ric-bdu@yandex.ru