

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СХЕМЫ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 01
«Двигатели внутреннего сгорания»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2024

УДК 621.4+662.7(075.8)
ББК 31.365я7
А58

С о с т а в и т е л и:
В. В. Альферович, С. Г. Беть

Р е ц е н з е н т ы:
В. Е. Тарасенко, А. С. Климук

Альтернативные схемы тепловых двигателей и перспективные
А58 виды топлива : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / сост. :
В. В. Альферович, С. Г. Беть. – Минск : БНТУ, 2024. – 61 с.
ISBN 978-985-583-969-0.

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с программой дисциплины «Альтернативные схемы двигателей» и является методическим пособием для студентов, выполняющих лабораторные работы по этой дисциплине. Пособие включает одиннадцать работ. В каждой лабораторной работе приводятся общие сведения по изучаемому вопросу, дается описание схемы двигателя или альтернативного топлива, а также представлены контрольные вопросы для самопроверки.

УДК 621.4+662.7(075.8)
ББК 31.365я7

ISBN 978-985-583-969-0

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий во всех областях жизнедеятельности человека, а также улучшение мирового экономического климата в XX веке привело к резкому демографическому росту, при этом население Земли за последние 100 лет выросло более чем в 5 раз. Учитывая прогнозы специалистов, до 2050 г. ожидается дальнейшее увеличение общей численности населения примерно на четверть от уровня 2015 г. По мере роста численности населения наблюдается тенденция постоянно растущего спроса на энергоресурсы во всех областях деятельности человека, вследствие чего неминуемо будет происходить удорожание нефтепродуктов, что, с одной стороны, приведет к увеличению стоимости энергоресурсов, будь то бензин или электроэнергия, с другой стороны, приведет к росту популярности технологий в области альтернативной энергетики.

На сегодняшний день тепловые двигатели являются основой энергоустановок как в транспортной отрасли, так и на стационарных объектах малой энергетики. Наибольшее распространение в данных областях хозяйственно-экономической деятельности человека получили двигатели внутреннего сгорания (ДВС) с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ), что в основном связано с простотой и технологичностью их изготовления, а также удовлетворительными энергоэффективными и экологическими показателями. К настоящему времени развитие технологий позволило существенно улучшить как экономические, так и экологические показатели данного типа двигателей.

Целью данных лабораторных работ является расширение кругозора и углубление знаний по устройству и конструкции альтернативных тепловых двигателей, приобретения навыков по их разборке-сборке, изучение принципиальных схем основных и вспомогательных систем двигателей.

Каждая лабораторная работа рассчитана на два или четыре академических часа и включает:

- проверку самостоятельной подготовки студентов к работе;
- изложение преподавателем целей и содержания работы;
- выполнение работы;
- защиту оформленной работы.

Отчет о выполненной лабораторной работе оформляется каждым студентом и должен быть представлен преподавателю для проверки к следующему занятию. Защита работы проводится путем собеседования с преподавателем во время выполнения следующей лабораторной работы. Оформление отчета выполняется в соответствии с требованиями стандарта предприятия «Единая система учебной документации. Отчет о лабораторной работе. Общие требования и правила оформления. СТП 10-02.01.-87».

Лабораторная работа № 1

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЯ М-14В26

Цель работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.
2. Ознакомиться с кинематической схемой звездообразного двигателя М-14В26.
3. Рассмотреть особенности конструкции деталей КШМ двигателя и применяемые конструкционные материалы.
4. Углубить и закрепить теоретические знания по вопросам конструирования деталей кривошипно-шатунного механизма.

Общие положения

Двигатель М-14В26 – четырехтактный, бензиновый, воздушного охлаждения, со звездообразным расположением цилиндров. Он предназначен для установки на вертолет Ка-28 в количестве двух штук. Двигатель с внешним смесеобразованием. Приготовление горючей смеси производится в карбюраторе, а подача топлива из бака в карбюратор осуществляется топливным насосом пластинчатого типа.

Двигатель не высотный, но для улучшения эксплуатационных характеристик имеет низконапорный нагнетатель. Специальный редуктор двигателя обеспечивает передачу крутящего момента от коленчатого вала к распределительному редуктору вертолета.

Картер двигателя разъемный. В полости картера редуктора размещен механизм редуктора, комбинированная муфта и привод вентилятора системы охлаждения. Внутри среднего картера находится кривошипно-шатунный механизм, а снаружи установлено девять цилиндров и маслоотстойник. В полости передней части среднего картера размещаются детали механизма газораспределения. Внутри смесесборника картера смонтирован нагнетатель, а в полости задней крышки размещены приводы агрегатов, установленных на фланцах ее наружной поверхности.

Система смазывания основных узлов и деталей двигателя – циркуляционная под давлением. Зажигание топливовоздушной смеси в цилиндрах производится с помощью магнето и запальных свечей, установленных по две на каждый цилиндр

Запуск двигателя производится сжатым воздухом, поступающим из воздушной системы вертолета. Распределение топливовоздушной смеси по цилиндрам в соответствии с порядком их работы осуществляется распределителем сжатого воздуха через пусковые клапаны, размещенные в головках каждого цилиндра. Топливо перед запуском двигателя заливается в смесесборник нагнетателя через заливочные форсунки при помощи пускового насоса (шприца). Кинематическая схема двигателя представлена на рис 1.1.

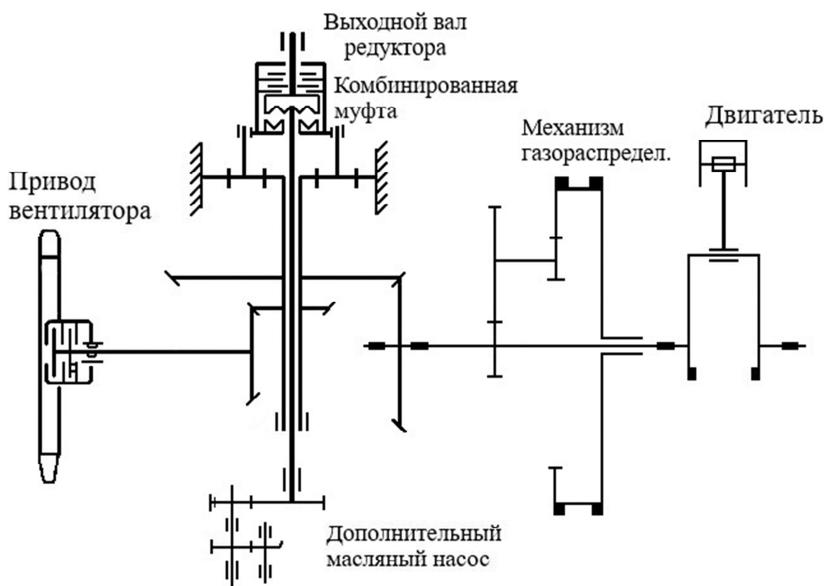


Рис. 1.1. Кинематическая схема двигателя М-14В26

На двигателе установлены следующие агрегаты: на картере редуктора – дополнительный масляный насос НР-14В; на смесесборнике – карбюратор АК-14В; на корпусе задней крышки картера – два магнето М9-35М, генератор ГСР-3000М, распределитель сжатого воздуха, компрессор АК-50Т, датчик температуры ДТЭ-1, основной

масляный насос МН-14А и бензонасос 702 МЛ. Осевой вентилятор системы охлаждения расположен на передней части редуктора. Находящиеся в эксплуатации двигатели имеют ресурс до первого ремонта 500 ч, причем по мере накопления опыта эксплуатации и совершенствования конструктивных узлов, ресурс двигателя может значительно увеличиться.

Мощность, развиваемая двигателем, не полностью передается на несущий винт. Часть мощности (около 8 %) расходуется на привод вентилятора, часть (около 5–7 %) на преодоление трения в редукторах и трансмиссии и около 8–10 % у одновинтового вертолета на привод рулевого винта.

Относительная масса силового привода, равная массе двигателя с трансмиссией, отнесенный к мощности двигателя, составляет 1,26–2,51 кг/кВт, что является их главным недостатком. Кроме того, он отличается сложностью конструкции и большими затратами времени на техобслуживание, особенно при низких температурах наружного воздуха.

Достоинствами такого силового ДВС является его малый удельный расход топлива и хорошая приемистость.

Технические и эксплуатационные данные двигателя М-14В26 приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Технические и эксплуатационные данные двигателя М-14В26

Тип	Поршневой с внешним смесеобразованием
Диаметр цилиндров, мм	105
Ход поршня, мм	130 для цилиндра №4
Рабочий объем всех цилиндров, л	10,16
Степень сжатия	6,3
Мощность, кВт	238,9
Частота вращения, мин ⁻¹	2800 – взлетный режим; 1200 – режим малого газа, холостого хода
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	360–394

Тип	Поршневой с внешним смесеобразованием
Направление вращения коленчатого вала	Против часовой стрелки, если смотреть со стороны задней крышки
Порядок нумерации цилиндров	Против часовой стрелки, если смотреть со стороны задней крышки и считать верхний цилиндр первым. Главный шатун расположен в цилиндре № 4
Диаметр двигателя по крышкам клапанных кареток, мм	985
Длина двигателя с вентилятором, мм	1060
Масса двигателя (без генератора), компрессора, рамы с болтами и деталей выпускного коллектора; кг	252
Тип карбюратора	Беспоплавковый АК-14В
Тип бензонасоса	Коловратный 702 МЛ
Тип основного масляного насоса	Шестеренчатый МН-14А
Давление масла в главной магистрали, МПа	0,5–0,7
Система зажигания	Магнето М-9-25М, 2 шт.,
Свечи зажигания	СД-49 СММ, 2 шт. на цилиндр
Система запуска	Воздушная
Воздушный компрессор	Поршневой, двухступенчатый, АК-50
Порядок работы цилиндров	1-3-5-7-9-2-4-6-8

Цилиндропоршневая группа и условия ее работы.

Сила давления газов в цилиндрах достигает 45 кН. Поршень устанавливается в гильзу с диаметральной зазором 0,33–0,965 мм. Рабочие температуры днища – 300 °С, а боковой поверхности – 120–140 °С. Поршневые кольца обеспечивают герметизацию КС и,

соприкасаясь с рабочими газами и поршнем, нагревается до температуры 200–250 °С.

Цилиндр состоит из головки и гильзы. Головка цилиндра отлита из алюминиевого сплава АЛ15, обладающего высокой прочностью и жаростойкостью, большой теплопроводностью и малым удельным весом. Для охлаждения головки снаружи имеются литые горизонтальные и вертикальные ребра. На горизонтальных ребрах головки спереди и сзади выполнены при литье два разреза, которые являются температурными компенсаторами. Они устраняют образование трещин на ребрах от неравномерного нагрева. Нижняя часть головки цилиндра имеет внутреннюю резьбу для соединения с гильзой и наружный цилиндрический буртик, на который напрессовывается стальное бандажное кольцо, обеспечивающее этой части головки необходимую жесткость.

В головке размещены три бронзовые втулки, в каждой из которых выполнены резьбовые отверстия. В двух втулках, симметрично расположенных относительно оси цилиндра, размещаются свечи зажигания, а в третьей установлен клапан системы запуска двигателя. Камера сгорания полусферической формы соединена с наружной поверхностью головки двумя окнами, заканчивающимися патрубками. В левый патрубок ввернут стальной омедненный штуцер впускной трубы. Для обеспечения герметичности соединения штуцер смазывают лаком по резьбе и ввертывают в нагретую головку. Между штуцером и головкой устанавливается алюминиевая прокладка.

На правый патрубок головки навернуто бронзовое кольцо с наружной резьбой для навинчивания на него накладной гайки выпускного коллектора. В верхней части головки отлиты две коробки клапанного механизма, где расположены клапаны. Оси направляющих втулок клапанов расположены в плоскости вращения коленчатого вала под углом 75° один к другому. Большой угол развала между клапанами позволяет усилить обребрение и улучшить охлаждение центральной части головки над камерой сгорания. Клапанные коробки закрываются крышками. Между крышкой и клапанной коробкой головки для уплотнения установлено резиновое кольцо.

Гильза изготовлена из поковки стали 38ХМЮА. На наружной поверхности в средней части гильзы имеются охлаждающие ребра, которые придают необходимую жесткость. В нижней части гильзы выполнен фланец с восемью отверстиями под шпильки крепе-

ния цилиндра к картеру и цилиндрический направляющий поясok. Между фланцами картера и гильзы устанавливается резиновое уплотнительное кольцо. Для повышения твердости и износостойкости внутренняя поверхность гильзы (зеркало) азотируется на глубину 0,5–0,7 мм, а затем шлифуется и хонингуется. Наружные поверхности гильзы покрываются термостойкой черной эмалью, предохраняющей их от коррозии.

Соединение головки с гильзой цилиндра выполнено резьбовым. При этом нагретую до температуры 350–370 °С головку наворачивают на холодную гильзу, обеспечивая таким образом необходимый натяг по резьбе и уплотнение по пояску. При остывании диаметр головки уменьшается и обжимает верхнюю часть гильзы, придавая ей форму усеченного конуса. При этом внутренний диаметр гильзы цилиндра по длине плавно уменьшается в верхней части примерно на 0,15–0,28 мм. При работе двигателя температура гильзы в верхней части достигает 180–230 °С, вследствие чего деформационное сужение уменьшается и диаметр гильзы по всей длине становится примерно одинаковым. Цилиндр такой конструкции называется цилиндром с деформационным сужением.

Поршень изготовлен штамповкой из алюминиевого сплава АК-4. Днище поршня снаружи плоское, полированное с двумя диаметрально расположенными выемками, предотвращающими удар поршня о клапаны в случае их зависания в открытом положении и при проворачивании коленчатого вала с разрегулированным ГРМ. На наружной цилиндрической поверхности поршня проточено пять кольцевых канавок под поршневые кольца. В 4-й сверху канавке просверлены отверстия, через которые масло, собранное кольцом, отводится в картер.

Для улучшения приработки и предотвращения задиров при недостаточной смазке зеркала цилиндра поршень покрыт по наружной поверхности коллоидальным графитом, смешанным с глифталевой эмалью и запечен в электропечи. Поршни одного комплекта подбираются по массе и являются взаимозаменяемыми деталями. Разность массы поршней допускается не более 5 г в пределах комплекта одного двигателя.

Поршневой палец плавающего типа служит для соединения поршня с шатуном. Палец выполнен пустотелым и изготовлен из высококачественной стали 18ХНВА. Продольное перемещение его в бобышках поршня ограничивается двумя алюминиевыми заглуш-

ками, выполненными со сферической рабочей поверхностью. В заглушках выполнены отверстия для суфлирования внутренней полости пальца и улучшения его смазки.

Поршневые кольца, установленные в верхние три канавки поршня, являются компрессионными, четвертое кольцо – маслосборное, а пятое – маслосбрасывающее. Все кольца изготовлены из хромотитановольфрамового чугуна марки ПВ. Заготовками их служат цилиндрические болванки, отлитые центробежным способом. Окончательно механически обработанные кольца проходят термофиксацию, после чего они имеют в свободном состоянии зазор (замок) в стыке 12–13 мм, а при обжати до рабочего состояния приобретают требуемую упругость 2,0–2,65 кг, а маслосборных – 2,23–2,72 кг. Компрессионные кольца имеют трапецевидное сечение и обращены меньшим основанием трапеции к оси цилиндра. Для повышения их износоустойчивости и улучшения условий работы, уплотнительные кольца хромируются с толщиной покрытия 0,10–1,15 мм. Замок в стыке компрессионных колец прямой. Поперечное сечение маслосборного кольца прямоугольное и имеет в средней части канавку с двенадцатью сквозными прорезями. Замок в стыке маслосборного кольца имеет угол в 45°, что снижает поступление масла в камеру сгорания.

Маслосбрасывающее кольцо имеет конусную рабочую поверхность. Положительной его особенностью является то, что при ходе поршня к ВМТ оно оставляет слой масла на стенке гильзы, а при движении к НМТ его соскабливает, препятствуя проникновению в камеру сгорания. Кольца подбираются к поршню, исходя из зазора А по образующей, а к гильзе – исходя из зазора Б в замке кольца (рис. 1.2, табл. 1.2).

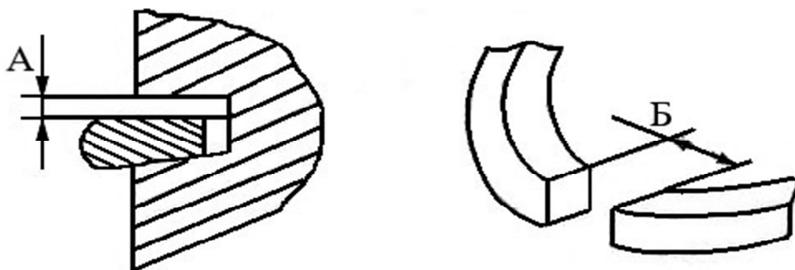


Рис. 1.2. Схема установки поршневых колец

Таблица 1.2

Монтажные зазоры поршневых колец

Тип кольца	Зазор Б в стыке (замок), мм	Зазор А по образующей, мм
1-е компрессионное, трапециевидное, хромированное	1,1–1,2	0,075–0,155
2 и 3-е компрессионные, хромированные	0,95–1,05	0,075–0,155
Маслосборное, прямоугольное	0,6–0,7	0,07–0,120
Маслосбрасывающее, конусное	0,3–0,4	0,045–0,095

Величина торцевых зазоров поршневых колец оказывает большое влияние на работу двигателя. Малый зазор в стыке при нагреве приводит к их поломке, а большой зазор вызывает повышенный подсос масла в камеру сгорания. Указанное приводит к залеганию поршневых колец, замасливаю и отказу свечей зажигания. При монтаже кольца располагают так, чтобы замки двух рядом расположенных колец были разведены под углом 180° , хотя при работе двигателя они перемешаются в канавках по окружности и относительное расположение их стыков не остается постоянным.

Порядок выполнения работы

1. Используя кинематическую схему, разобраться с принципом работы и особенностями привода узлов и вспомогательных систем двигателя.

2. Используя наглядные учебные пособия, изучить отличительные конструктивные решения основных деталей двигателя (цилиндр, поршень, кольца, шатун, коленчатый вал).

3. Разобраться с особенностями технологии производства и способами упрочнения рабочих поверхностей деталей двигателя, упомянутых выше.

4. Сделать эскизный рисунок одной из деталей (по согласованию с преподавателем).

Контрольные вопросы

1. Какими системами оборудован двигатель?
2. Какой выполнен тип соединения головки и гильзы цилиндра?
3. Какими особенностями характеризуется ГРМ двигателя?
4. Определите порядок нумерации цилиндров. В каком цилиндре размещен главный шатун?
5. Что такое ресурс двигателя и какая его величина?

Лабораторная работа № 2

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ М-14В26

Цель работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.
2. Изучить особенности конструкций главного и прицепных шатунов.
3. Оценить особенность конструкции составного коленчатого вала.
4. Разобраться в кинематических и динамических особенностях кривошипно-шатунного механизма с прицепными шатунами.
5. Сделать анализ применяемых конструкционных материалов.

Общие положения

Комплект шатунов двигателя состоит из одного главного и восьми прицепных шатунов (рис. 2.1).

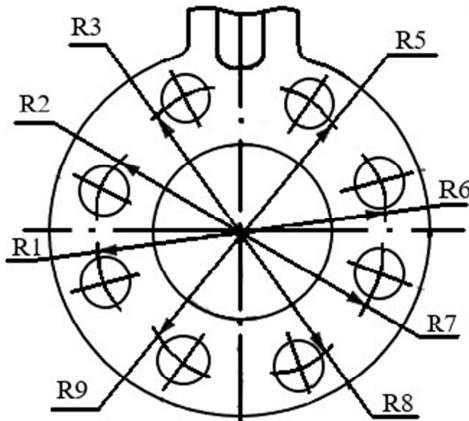


Рис. 2.1. Кривошипная головка главного шатуна

Главный шатун устанавливается в цилиндре № 4. Длина главного шатуна 236,5 мм, а прицепного 189,5 мм. С увеличением длины

шатуна уменьшается величина боковой силы, но в то же время это приводит к увеличению габаритов и массы двигателя. КШМ этого двигателя относится к механизмам с эксцентрично сочлененными шатунами. Поэтому в сравнении с центральным КШМ он имеет ряд кинематических и динамических особенностей.

К основным особенностям кинематики двигателя М-14В26 можно отнести следующее:

1. Ход поршней в цилиндрах с прицепными шатунами больше хода поршней в цилиндре с главным шатуном, т. к. ось кривошипной головки главного шатуна вращается по окружности, а оси кривошипных головок прицепных шатунов перемещаются по эллипсам, большие полуоси которых больше радиуса кривошипа. Разница ходов поршней получается незначительной и не оказывает существенного влияния на работу двигателя (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Особенности кинематики КШМ двигателя

№ цилиндра	Ход поршня, мм	Угловое смещение ВМТ	Радиус подвески шатуна, мм
4	130,00	0	—
3,5	130,15	2°24′	47,00
2,6	130,23	2°10′	47,10
1,7	131,25	3°10′	47,25
9,8	130,39	1°27′	47,05

2. Имеет место линейное смещение ВМТ в цилиндрах с прицепными шатунами. Эта особенность проявляется в том, что расстояние от ВМТ до оси вращения коленчатого вала в цилиндрах с прицепными шатунами оказывается больше, чем в цилиндре с главным шатуном. Линейное смещение ВМТ вызывает различие объемов камер сгорания и, как следствие, мощностей в различных цилиндрах, что увеличивает неравномерность крутящего момента двигателя.

Негативные последствия линейных смещений ВМТ в цилиндрах устраняются в данном двигателе путем применения различных радиусов подвески прицепных шатунов к главному. Возможно применение прицепных шатунов различной длины или размещение фланцев картера для крепления цилиндров на различном расстоянии от оси двигателя, что технологически не целесообразно.

3. Наличие существенного углового смещения ВМТ в цилиндрах с прицепными шатунами приводит к неравенству фаз газораспределения и углов опережения зажигания в различных цилиндрах. В этой связи с целью сохранения одинаковых фаз, их регулировку производят относительно главного цилиндра. Это дает минимальное отклонение в фазах для цилиндров с прицепными шатунами.

Неравномерное расположение выступов на кулачковой шайбе магнето обеспечивает равномерное чередование вспышек во всех цилиндрах двигателя.

4. При демонтаже главного цилиндра и перемещении главного шатуна под действием собственного веса возможен выход нижнего масляного кольца поршней с противоположных цилиндров. Чтобы исключить подобное, необходимо снимать главный цилиндр при положении поршня в ВМТ и нельзя поворачивать коленчатый вал при снятом главном цилиндре.

Динамическими особенностями КШМ являются:

1. Суммарные силы, передаваемые от поршней через прицепные шатуны, дополнительно нагружают боковой силой главный шатун и его поршень, что повышает нагруженность цилиндропоршневой группы главного цилиндра.

2. Силы инерции поступательно-движущихся масс в главном и боковых цилиндрах различны по величине, что увеличивает неравномерность крутящего момента и вызывает появление дополнительных неуравновешенных сил инерции второго порядка.

Шатуны двигателя изготовлены из поковок высококачественной хромоникелевой стали 20ХНЗА и термически обработаны. После окончательной механической обработки шатуны отполированы. Стержень главного шатуна имеет переменное сечение, увеличивающееся к кривошипной головке. Кривошипная головка главного шатуна неразъемная, имеет центральную расточку и отверстия для установки пальцев прицепных шатунов.

Прицепные шатуны имеют стержни постоянного по длине сечения. Диаметры поршневых головок прицепных шатунов выполнены большего размера, чем диаметры кривошипных головок. В головках шатунов установлены втулки из листовой твердокатаной бронзы. Прицепные пальцы изготовлены из высококачественной хромоникельмолибденовой стали 18ХМВА. Для повышения износостойкости наружная поверхность пальца цементируется.

Коленчатый вал изготавливается из поковок высококачественной, термически обработанной хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА с закалкой в масле и последующим отпуском. Коленчатый вал опирается на три подшипника картера: два опорных роликовых и один опорно-упорный шариковый. Роликовые подшипники воспринимают только радиальные нагрузки, а шариковые – как радиальные, так и осевые.

Для обеспечения сборки коленчатый вал выполнен разъемным, состоящим из двух частей: передней и задней. Передняя часть включает в себя шатунную шейку, щеку и носок с двумя коренными шейками. Носок вала выполнен полым. Внутри носка вала спереди запрессована опорная втулка, которая по внутренней поверхности залита слоем свинцовистой бронзы. Эта втулка является задней опорой хвостовика ведущего зубчатого колеса редуктора.

Задняя часть коленчатого вала выполнена в виде щеки, отштампованной за одно целое с цилиндрическим полым хвостовиком, коренная шейка которого опирается на задний роликоподшипник. Верхняя часть щеки имеет расточку под шатунную шейку передней части и отверстие под стяжной болт. Последний изготовлен из стали 40ХНМА, термически обработан и предназначен для соединения частей коленчатого вала.

Противовесы (сегментной формы) смонтированы на продолжения щек коленчатого вала и предназначены для уравнивания сил инерции вращательно и поступательно движущихся масс первого порядка. Вследствие маятниковой подвески заднего противовеса он обеспечивает гашение опасных крутильных колебаний коленчатого вала, вызываемых гармониками высших порядков.

Контрольные вопросы

1. С какими узлами и механизмами взаимодействует коленчатый вал?
2. Расскажите о кинематических и динамических особенностях ДВС и причинах их возникновения.
3. Какие требования к конструкции и смазке деталей обуславливают применение свинцовистой бронзы в главном шатунном подшипнике?
4. Конструктивные особенности главного и прицепных шатунов.

Лабораторная работа № 3

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА, УЗЛЫ И АГРЕГАТЫ ДВИГАТЕЛЯ ГТД-350

Цель работы:

1. Ознакомиться с общими сведениями о двигателе.
2. Изучить особенности компоновки силовой схемы.
3. Ознакомиться с основными узлами и системами двигателя.
4. Перечислить применяемые конструкционные и эксплуатационные материалы.
5. Расширить и углубить знания по конструкции турбовальных двигателей.
6. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.

Общие положения

Авиационный турбовальный двигатель ГТД-350 (рис. 3.1) устанавливается на вертолете Ми-2. При создании двигателя был учтен отечественный и зарубежный опыт проектирования, производства и эксплуатации авиационных двигателей. По своим техническим данным и эксплуатационным качествам ГТД-350 соответствует техническим требованиям, предъявляемым к двигателям данного класса.

В силовую установку вертолета входят два взаимозаменяемых двигателя ГТД-350 и главный редуктор ВР-2. Задние выходные валы двигателей соединяются с главным редуктором, который передает суммарный крутящий момент несущему и рулевому (хвостовому) винтам.

Наличие на вертолете двух двигателей повышает безопасность полета, т. к. при неисправности одного из них второй обеспечивает продолжение полета до места посадки.

Особенность конструкции двигателя ГТД-350 – наличие в нем свободной турбины (турбины винта), мощность которой передается главному редуктору вертолета и составляет эффективную мощность двигателя. Свободная турбина кинематически не связана с турбокомпрессорной частью двигателя.

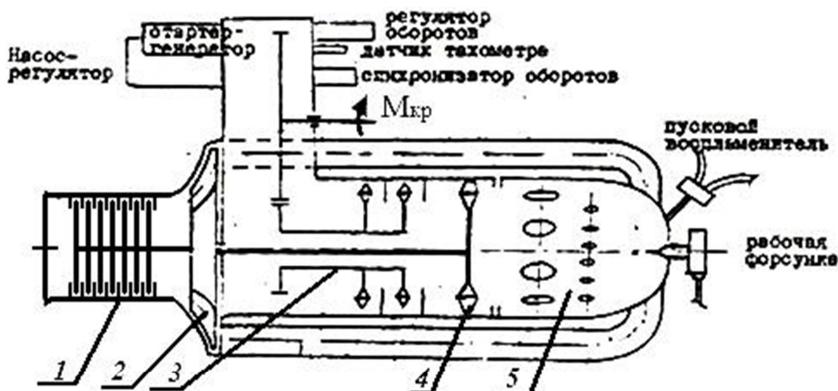


Рис. 3.1. Принципиальная схема двигателя ГТД-350:

- 1 – осевые ступени компрессора; 2 – центробежная ступень компрессора;
3 – свободная турбина; 4 – первая турбина.

Эта особенность двигателя имеет ряд конструктивных и эксплуатационных преимуществ: позволяет получить желаемую частоту вращения вала несущего винта вертолета независимо от частоты вращения ротора турбокомпрессора двигателя; исключает необходимость иметь в силовой установке вертолета фрикционную муфту (муфту включения); обеспечивает более легкий запуск двигателя, т. к. для этого требуется раскрутка только ротора турбокомпрессора; позволяет получить оптимальные расходы топлива при различных условиях эксплуатации двигателя.

Двигатель ГТД-350 имеет несколько необычную конструктивную схему – с петлевым направлением движения газа, что характерно для ТВД малой мощности и турбокомпрессоров. В обычных, широко распространенных в настоящее время схемах двигателей, камера сгорания расположена непосредственно за компрессором, а на ГТД-350 камера сгорания вынесена за турбины, которые приближены к компрессору. При такой компоновке узлов сокращается длина силовых валов двигателя, что дает возможность применять более высокие частоты вращения роторов и тем самым обеспечивается снижение удельной массы двигателя и повышение его экономичности.

Двигатель состоит из следующих основных узлов и систем: компрессора с семью осевыми и одной центробежной ступенями; индивидуальной (трубчатой) камеры сгорания; турбины компрессора

и свободной турбины; выходного устройства; редуктора; систем охлаждения, смазывания и суфлирования; систем питания топливом, регулирования и управления; систем электропитания, запуска и дренажной; противообледенительной и противопожарной систем, обеспечивающих работу двигателя на земле и в полете.

Компрессор двигателя состоит из разъемного корпуса с направляющими аппаратами, входного направляющего аппарата, ротора с осевыми и одним центробежным колесом, воздухозаборной улитки с безлопаточным диффузором, из которого сжатый воздух по двум горизонтально расположенным вдоль двигателя трубам подается в камеру сгорания.

Устойчивая работа компрессора в процессе запуска двигателя на режиме малого газа и переходных режимах до частоты вращения турбокомпрессора 68–78 % от номинальной обеспечивается перепуском части воздуха из 6-й ступени в атмосферу через клапан, установленный на корпусе компрессора. При полете вертолета при низких температурах и высокой влажности воздуха, входная часть компрессора обогревается воздухом, отбираемым за 6-й ступенью компрессора.

Камера сгорания состоит из корпуса с двумя воздухоотводящими трубами и цилиндрической жаровой трубы. В передней части жаровой трубы установлена топливная форсунка. Воспламенение топлива при запуске двигателя осуществляется посредством пускового воспламенителя, на котором смонтирована пусковая форсунка и запальная свеча СН-18УЛ. В камере сгорания воздушный поток, поступающий из подводящих труб, меняет свое направление на 180°, и горячие газы направляются вперед на турбину двигателя.

Турбина компрессора состоит из промежуточного корпуса, одноступенчатого ротора, соплового аппарата и опор ротора – двух подшипников качения, переднего – роликового и заднего – шарикового. Крутящий момент передается от ротора турбины на ротор компрессора через переходной вал, соединенный с валом турбины шлицами.

Детали турбины подвержены влиянию потока горячих газов и действию больших механических нагрузок. Поэтому при изготовлении турбин применяются жаростойкие и жаропрочные материалы. Большинство деталей турбина для улучшения условий их работы охлаждается воздухом.

Свободная турбина состоит из соплового аппарата 1-й ступени, соплового аппарата 2-й ступени, двухступенчатого ротора, установленного на двух подшипниках качения. Конструктивно свободная турбина выполнена аналогично турбине компрессора. На конце вала турбины находится ведущее зубчатое колесо редуктора.

Выходное устройство двигателя нерегулируемое. Оно состоит из газосборника и выхлопных патрубков и обеспечивает отвод горячих газов в атмосферу под углом 90° к оси двигателя. Газосборник, выполняя функции отвода газов, является силовым узлом двигателя и служит корпусом опор свободной турбины, а также связующим звеном, посредством которого турбина и камера сгорания крепятся к корпусу редуктора.

Редуктор представляет собой простое одинарное цилиндрическое зубчатое зацепление, передающее крутящий момент от вала свободной турбины к валу, от которого крутящий момент передается к главному редуктору вертолета. В корпусе редуктора размещены приводы к агрегатам, обеспечивающим работу и регулирование двигателя. Агрегаты крепятся на фланцах, расположенных на стенках корпуса редуктора.

Система смазывания двигателя циркуляционная, обеспечивает подачу масла для смазки трущихся деталей, отвод и охлаждение отработавшего масла. Основной агрегат этой системы – блок масляных насосов, размещенных в корпусе редуктора. Он состоит из одного нагнетающего и четырех откачивающих насосов шестеренчатого типа.

Рабочая жидкость системы – синтетическое маловязкое масло Б-3В. Оно обладает хорошей теплостабильностью и имеет приемлемую температурно-вязкостную характеристику. Однако следует помнить, что масло Б-3В токсично и требует соблюдения определенных мер предосторожности при работе с ним.

Топливная система обеспечивает подачу топлива в камеру сгорания в количествах, соответствующих режиму работы двигателя и условиям окружающей среды. По назначению и величине давления топлива в агрегатах и трубопроводах ее можно разделить на следующие системы:

– систему низкого давления, которая обеспечивает размещение и хранение на борту вертолета запаса топлива, его очистку и подачу к насосу-регулятору НР-40Т (ИР-40ТА);

– систему высокого давления, агрегаты которой предназначены для повышения давления топлива и подачи его в камеру сгорания в распыленном состоянии в количестве, зависящем от режима работы двигателя и условий окружающей среды;

– регулирование частоты вращения роторов свободной турбины и турбокомпрессора осуществляется изменением подачи топлива, поэтому целый ряд агрегатов системы высокого давления (НР-40Т, НР-40ТА, СС-40, РО-40, РО-40Т, РО-40ТА) отнесены к системе управления и регулирования двигателя;

– пусковую топливную систему, предназначенную для подачи топлива при запуске двигателя;

– систему дренажа, обеспечивающую слив топлива в блок дренажных клапанов из основной рабочей форсунки, кожуха камеры сгорания и пусковой форсунки.

Система управления и регулирования – одна из наиболее сложных и важных систем двигателя. Она включает в себя агрегаты, обеспечивавшие управление подачей топлива, открытием и закрытием клапана перепуска воздуха из компрессора двигателя. Основные агрегаты этой системы: топливный насос-регулятор НР-40Т (НР-40ТА), регулятор частоты вращения свободной турбины РО-40Т (НР-40ТА), синхронизатор мощности СО-40, датчик сигналов ДС-40Т, клапан перепуска воздуха и противообледенения, пусковой воспламенитель, пусковая основная форсунка и блок дренажных клапанов.

Система управления и регулирования двигателями ГТД-350 вертолета Ми-2 включает в себя обычную вертолетную систему «шаг-газ», рукоятку коррекции, рычаги отдельного управления и агрегаты объединенного управления общим шагом несущего винта и двигателями, а также топливный насос-регулятор НР-40Т и регулятор частоты вращения свободной турбины РО-40Т (РО-40ТА). При работе системы автоматического поддержания постоянной частоты вращения свободной турбины, величина снимаемой мощности задается шагом несущего винта.

Управление шагом несущего винта осуществляется ручкой «шаг-газ», которая кинематически связана с рычагом управления насосов-регуляторов НР-40Т (НР-40ТА) обоих двигателей вертолета. Перемещение рычага «шаг-газ» вверх вызывает увеличение общего шага несущего винта и режима работы обоих двигателей.

При резком уменьшении режима работы двигателя или при подъеме на высоту клапан минимального давления насоса-регулятора предотвращает падение расхода топлива ниже величины, необходимой для обеспечения нормального процесса горения в камере сгорания и поддержания заданной частоты вращения.

Система запуска двигателя ГТД-350 состоит из стартера-генератора СТГ-3, пусковой панели ПСГ-14А, двух аккумуляторных батарей ИСАМ-28, аэродромной розетки, переключающих контакторов и блокировочных реле. В процессе запуска двигателя также принимает участие комплексный агрегат ДМР-200Д, регулятор напряжения РН-120У и автомат АЗП-8М. Из перечисленных агрегатов на двигателе устанавливается только стартер-генератор. При запуске двигателя предусмотрено переключение источников тока с 24 на 48 В. Это повышает интенсивность раскрутки и надежности запуска двигателя.

Воспламенение топлива при запуске каждого двигателя осуществляется системой зажигания, которая состоит из агрегатов зажигания СКНД-II-1 и свечей СП-18УА.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о принципиальной схеме ГТД.
2. Объясните преимущества ГТД с петлевой схемой движения газа.
3. Опишите преимущества и недостатки ГТД со свободной тяговой турбиной.
4. Определите область применения ГТД.

Лабораторная работа № 4

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель и содержание работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.
2. Изучить принципиальную схему турбореактивного двигателя (ТРД).
3. Изучить особенности конструкции деталей компрессора и турбины.
4. Ознакомиться с применяемыми конструкционными материалами.

Общие положения

Реактивный двигатель – двигатель, создающий необходимую для движения силу тяги посредством преобразования внутренней энергии топлива в кинетическую энергию реактивной струи рабочего тела. Существуют два основных класса реактивных двигателей. Воздушно-реактивные двигатели и ракетные двигатели.

Воздушно-реактивные двигатели – тепловые двигатели, которые используют энергию окисления горючего кислородом воздуха, забираемого из атмосферы. Рабочее тело этих двигателей представляет собой смесь отработавших газов с остальными компонентами воздуха. Ракетные двигатели в отличие от воздушно-реактивных содержат все компоненты рабочего тела на борту и способны работать в любой среде, в том числе и в безвоздушном пространстве.

Одним из фундаментальных законов природы является закон сохранения количества движения, как и закон сохранения энергии. Когда какая-нибудь масса вещества m начинает двигаться со скоростью V , то она приобретает количество движения (mV). Если окружающий нас воздух или какой-либо другой газ приобретает какое-то количество движения (mV) в одном направлении, то относительно точки отсчета, такое же количество движения должно появиться и в противоположном направлении, чтобы алгебраическая сумма

обоих этих количеств была равна нулю. Последнее означает, что общее количество движения остается неизменным. Если точкой отсчета считать самолет или какой-то аппарат, то это количество движения сообщается телам. Таким образом, чтобы заставить какую-либо массу (самолет, автомобиль и т. п.) двигаться в одном направлении, нужно сообщить другой массе движение в противоположном направлении. При этом обе упомянутые массы должны, непосредственно воздействуя друг на друга, приобрести строго определенные скорости в соответствии с законом сохранения количества движения.

Реактивный двигатель сам непосредственно отбрасывает назад массу газов, приобретая вместе с самолетом скорость в противоположном направлении. Однако не всегда движение создается непосредственно самим двигателем, т. е. машиной, вырабатывающей механическую энергию за счет расходования энергии других видов: тепловой, химической, электрической и т. п. В качестве примера возьмем поршневой двигатель внутреннего сгорания самолета, который вращает воздушный винт-пропеллер. Приводимый им в движение винт-пропеллер отбрасывает массу воздуха в направлении, противоположенном движению самолета. В этом случае устройство для отброса массы воздуха (двигатель) отделено от двигателя. Реактивный двигатель или двигатель прямой реакции (как его иногда называют) совмещает в себе функции собственно двигателя и движителя. При этом движущая (тяговая) сила в нем создается в результате отброса некоторой массы газов. В этом-то и заключается его принципиальное отличие от двигателей транспортных устройств. В других типах реактивных двигателей отбрасываемой массой могут быть продукты различных химических реакций, происходящих в двигателе, и даже необычные частицы: ионы, плазма и даже кванты электромагнитной энергии. Семейство реактивных двигателей очень обширно и каждый из них проявляет свои лучшие свойства в определенных условиях работы и при определенной скорости полета, вплоть до самых больших.

Реактивные двигатели, благодаря своей принципиальной простоте, обладают замечательными характеристиками в отношении удельной мощности. Следует отметить, что в этом отношении они не имеют себе равных среди всех известных двигателей. Именно с помощью реактивных двигателей достигнуты серьезные успехи в борьбе за резкое повышение скорости: в авиации превышена скорость

звука, а в ракетной технике и астронавтике достигнуты рубежи первой и второй космических скоростей.

Из курса термодинамики известно, что превосходством в отношении мощности будет обладать тот двигатель, в рабочем цикле которого участвует большое массовое количество воздуха, обеспечивающего высокоэффективное сгорание. У поршневого двигателя свежий заряд поступает не непрерывно, а только в течение процесса всасывания, составляющего относительно небольшую часть всего рабочего цикла двигателя. В реактивном двигателе воздух течет непрерывно с весьма большой скоростью через все миделевое (максимальное поперечное) сечение двигателя.

Очевидно, что все дальнейшие процессы изменения состояния воздуха, составляющие рабочий цикл двигателя и приводящие к образованию реактивной тяги, т. е. движущей силы, должны протекать вдоль оси двигателя, причем одновременно, но в разных его зонах как бы в своеобразном конвейере. Таким образом, в реактивном двигателе рабочие процессы протекают последовательно в пространстве, а в поршневом – во времени. Характер же этих процессов один и тот же: все они необходимы для эффективного преобразования химической энергии топлива в полезную мощность двигателя. Принципиальная кинематическая схема турбореактивного двигателя (ТРД) представлена на рис. 4.1.

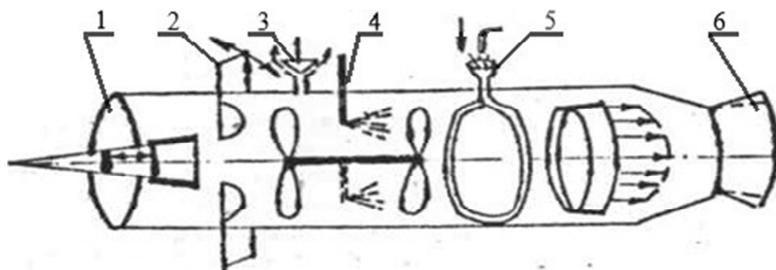


Рис. 4.1. Принципиальная схема ТРД:

- 1 – регулируемый воздухозаборник; 2 – поворотный механизм направляющих лопаток компрессора; 3 – перепуск воздуха из компрессора; 4 – подача топлива в камеру сгорания; 5 – подача топлива в форсажную камеру; 6 – регулируемое реактивное сопло

Передняя часть двигателя, в которую поступает атмосферный воздух, носит название **воздухозаборник**. Из воздухозаборника воздух

поступает в компрессор, где происходит его сжатие и повышение давления. Далее сжатый воздух поступает в камеру сгорания, в которой происходит его нагрев до необходимой рабочей температуры от сгорания впрыснутого туда через форсунку топлива. Воспламенение топливовоздушной смеси обеспечивают запальные свечи системы зажигания. Они используются только при пуске двигателя. После запуска двигателя воспламенение новых порций топлива осуществляется от существующего факела пламени.

Местом, где тепловая энергия преобразуется в полезную механическую работу, является **осевая турбина**. Расширяющиеся в турбине газы отдают рабочим колесам свою энергию; турбина вращается с огромной скоростью (до 30 тыс. мин⁻¹), развивая мощность в десятки тысяч кВт. Практически вся эта мощность затрачивается на привод компрессора, для чего турбина связывается с ним силовым валом. Компрессор вместе с турбиной и соединительным валом называют **роотором двигателя**, т. к. это единственная его вращающаяся часть.

Давление газов за турбиной всегда больше атмосферного, поэтому они сохраняют способность дальнейшего расширения с совершением полезной работы. Часть двигателя, в которой происходит образование реактивной струи, называется **реактивным соплом** с постоянно уменьшающимся проходным сечением в виде усеченного конуса. Силу разливаемой двигателем тяги определяют по величине реактивной струи. Величину тяги можно вычислять по скорости истечения, точнее, по количеству движения вытекающих из двигателя газов.

Очевидно, что направление вперед (как и сама сила тяги) усилия от газового давления возникает на тех участках газоздушного тракта двигателя (в компрессоре и камере сгорания), где давление повышено и оно действует на поверхность двигателя так, что как бы толкает их вперед. Это происходит на участке тракта, представляющем расширяющийся канал. Наоборот, если канал для течения газов сужается, то сила давления газов действует назад, т. е. уменьшает реактивную тягу.

Практически силу реактивной струи подсчитывают по формуле:

$$R = \frac{m_{\text{в}}}{g} \cdot (W - V), \text{ кг,}$$

где m_v – масса воздуха;

g – ускорение свободного падения;

W – скорость воздуха;

V – скорость летательного аппарата.

При рассмотрении энергетических преобразований в двигателе, в частности, при оценке его КПД при неизменной массе вытекающих газов, приходится иметь дело с кинетической энергией газов в реактивной струе, а эта энергия пропорциональна квадрату скорости истечения. Поэтому, например, при увеличении КПД двигателя, скажем, на 20 % должно означать увеличение на 20 % не скорости, а квадрата скорости истечения. Увеличивая полезную мощность двигателя вчетверо, мы увеличиваем тягу двигателя только вдвое, если это увеличение достигнуто в результате увеличения скорости истечения газов.

Если же увеличение полезной мощности вчетверо достигнуто при постоянной скорости истечения, а именно в результате увеличения в 4 раза массы вытекающих газов, то в таком случае тяга увеличивается уже не в 2, а также в 4 раза.

Таким образом, при одной и той же затрате топлива и одинаковом совершенстве двигателя выгодно увеличить массу вытекающих газов и уменьшить скорость истечения. Это увеличивает тягу двигателя и уменьшает расход топлива на один килограмм тяги, т. е. выгодна большая масса и малая скорость, а не малая масса и большая скорость истечения газа.

Это реализовано в турбовинтовых двигателях с 3–4-ступенчатой турбиной, обеспечивающей меньшую суммарную массу двигателя и топлива в длительном полете. С ростом скоростей полета эти преимущества постепенно исчезают и турбовинтовой двигатель уступает место турбореактивному двигателю.

Порядок выполнения работы

1. Разобраться на макетном образце с принципом работы и устройством всех рабочих отсеков двигателя.

2. Разобраться с особенностями технологии производства и применением конструкционных материалов для наиболее ответственных деталей (лопатки, камера сгорания, направляющие решетки).

3. Выполнить эскиз одного из характерных конструктивных решений детали двигателя по согласованию с преподавателем.

Контрольные вопросы

1. Перечислите ступени непрерывного изменения состояния рабочего газа в ТРД.
2. Объясните назначение компрессора и реактивного сопла.
3. Чем определяется моторесурс турбореактивного двигателя?
4. Расскажите о конструкции двигателя.
5. Назовите классы реактивных двигателей и их отличия.

Лабораторная работа № 5

СВОБОДНОПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Цель работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.

2. Изучить конструкции и работы свободнопоршневых дизель-компрессоров.

Общие положения

Машины со свободно движущимися поршнями бывают двух типов: свободнопоршневые дизель-компрессоры (СПДК) и свободнопоршневые генераторы газа (СПГГ). Это машины без кривошипно-шатунного механизма – их поршни получают поступательное движение непосредственно от расширяющихся газов двигателя внутреннего сгорания. Двигатель представляет собой двухтактный дизель с противоположно движущимися поршнями. К цилиндру двигателя присоединены цилиндры компрессора. Поршни компрессора и двигателя изготовлены как одно целое и составляют дифференциальный поршень. Такие компрессоры проще в устройстве и эксплуатации. Они применяются для сжатия многих газов и бывают как одноступенчатые, так и многоступенчатые.

На рис. 5.1 изображена схема симметричного одноступенчатого свободнопоршневого дизель-компрессора. Поршни *1* и *12* при движении навстречу друг другу в цилиндре двигателя *6* сжимают воздух до температуры вспышки топлива. Топливо в цилиндр двигателя впрыскивается форсункой *5* в момент подхода поршней к внутренней мертвой точке. При горении топлива в цилиндре резко возрастает давление, которое действует на дифференциальные поршни *1* и *12*, раздвигая их в противоположные стороны. В этот период в цилиндрах *2* и *10* продувочного насоса через клапаны *3* и *9* происходит впуск свежего воздуха, а в цилиндрах компрессора *13* и *20* – сжатие и нагнетание газа. На некотором отрезке пути поршни открывают сначала выпускные *7*, а затем продувочные *4* окна. Сжатый воздух через нагнетательные клапаны *8* и *18* поступает в сборник

продувочного воздуха 17 и из него через продувочные окна подается в цилиндр. Этот воздух вытесняет из цилиндра двигателя через окна 7 продукты сгорания в выхлопную камеру 15. После продувки в цилиндре двигателя остается определенное количество воздуха, необходимое для сгорания топлива в следующем рабочем цикле.

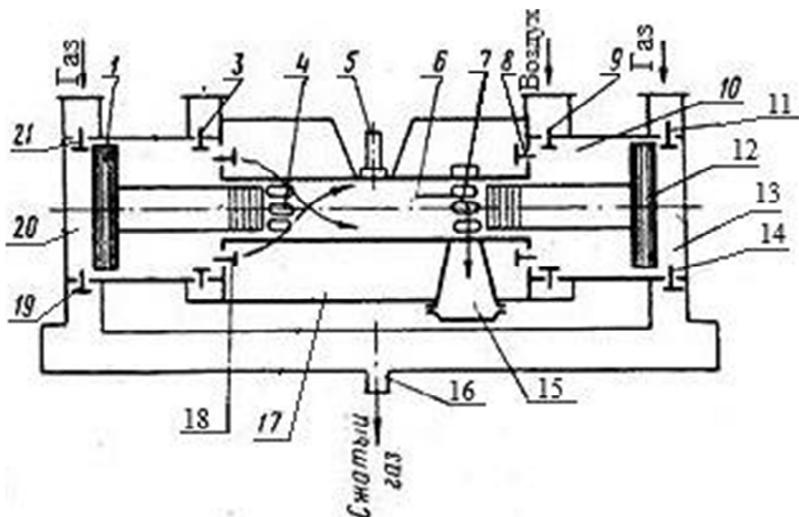


Рис. 5.1. Схема свободнопоршневого дизель-компрессора

Из цилиндров компрессора не весь сжатый газ нагнетается в коллектор 16, а определенная часть его остается. Оставшийся в цилиндрах сжатый газ является буфером, предотвращающим удары поршней о крышки цилиндров компрессора, т. к. он содержит энергию, необходимую для обратного движения поршней. Под действием давления этого газа поршни 1 и 12 двигаются из крайнего удаленного положения навстречу друг другу. При этом поршни перекрывают продувочные 4 и выпускные 7 окна, после чего происходит сжатие оставшегося воздуха в цилиндре двигателя 6. Одновременно с этим в цилиндрах 2 и 10 продувочного насоса осуществляется сжатие и нагнетание воздуха в сборник продувочного воздуха 17.

Давление оставшегося газа в цилиндрах компрессора падает и происходит впуск новой порции газа через клапаны 11 и 12. В конце сжатия воздуха в цилиндр двигателя 6 через форсунку 5 подается

новая доза топлива, и цикл повторяется. Нагнетание сжатого газа производится через клапаны *14* и *19*.

Принципиально по такой же схеме работают и свободнопоршневые генераторы газа, только в цилиндрах компрессора сжимают воздух, который поступает в двигатель, для осуществления в нем продувки и высокого наддува. Отработавшие газы двигателя, имеющие высокое давление и температуру, направляются для вращения газовой турбины, которая связана с потребителем энергии.

Интерес к исследованиям свободнопоршневых двигателей обусловлен рядом преимуществ в сравнении с классическими ДВС с КШМ. Одним из таких преимуществ является относительная простота конструкции. По сравнению с классическим двигателем с КШМ СПДВС обладает на 40 % меньшим количеством элементов и в нем отсутствуют вращающиеся части, что позволяет, во-первых, улучшить массогабаритные показатели двигателя, во-вторых, снизить инерционные нагрузки на детали двигателя. Также следует отметить, что СПДВС, ввиду меньшего числа пар трения и отсутствия боковой силы, обладают меньшими механическими потерями.

Механический КПД СПДВС может достигать значения 0,93–0,95, что существенно превышает уровень ДВС с КШМ, находящийся в диапазоне 0,8–0,85. Также не стоит забывать, что более простая конструкция в сравнении с двигателями с КШМ позволяет существенно снизить расходы на изготовление, эксплуатацию и обслуживание энергоустановок с такими силовыми агрегатами.

Еще одним преимуществом СПДВС при его использовании совместно с линейными электрическими генераторами является возможность непрерывного изменения геометрической степени сжатия в двигателе. При этом, во-первых, двигатель, при внесении незначительных изменений в конструкцию системы топливоподачи, может работать на более широкой номенклатуре топлив, включая автомобильные бензины всех марок, дизельное топливо и различные виды газового топлива, а во-вторых, в случае использования бензина в двигателе, может быть реализован процесс управляемого самовоспламенения НСЦИ (Homogeneous charge compression ignition), позволяющий существенно улучшить показатели топливной экономичности.

В качестве дополнительного преимущества СПДВС можно выделить их модульность. В зависимости от требуемых энергетических параметров используемой энергоустановки возможно использова-

ние нескольких модулей равной мощности, что позволит получить лучшие массогабаритные показатели, а также повысить удобство компоновки такой установки, в том числе на борту автомобиля, в сравнении с энергоустановкой на базе ДВС с КШМ с эквивалентными энергетическими показателями.

При всем многообразии преимуществ СПДВС не обделены недостатками, рассмотрение которых целесообразно проводить для каждого из существующих типов таких двигателей.

Так, одноцилиндровый СПДВС является неуравновешенным, что является причиной повышенного виброакустического воздействия на окружающую среду при его работе. Кроме того, так как для осуществления такта сжатия используется только энергия нагрузочного устройства, которую может выполнять электрическое, гидравлическое, пневматическое устройство и др. Для данного типа СПДВС предпочтителен двухтактный процесс работы для снижения количества преобразований энергии. Также следует отметить, что СПДВС, причем это касается всех типов, не содержат в конструкции каких-либо вращающихся частей, что создает трудность для классического привода распределительного вала, а непосредственный привод клапанов существует на данный момент лишь в виде лабораторных образцов.

Что касается двухцилиндровых СПДВС, их недостатки разделяются по видам связи поршней: с жесткой связью поршней и без жесткой связи. Двухцилиндровый СПДВС с жестко связанными поршнями обладает всеми преимуществами одноцилиндрового двигателя и позволяет использовать энергию от сгорания топлива в одном цилиндре для осуществления процесса сжатия в другом цилиндре. Однако недостатком данной концепции является неуравновешенность сил инерции от движущихся частей, причем в большей степени, чем в одноцилиндровом двигателе, в связи с тем, что масса подвижных частей увеличивается за счет второго поршня и удлинения штока. Помимо увеличения массы существует еще ряд трудностей, связанных с контролем процесса сгорания, равномерностью работы цилиндров в связи с тем, что процессы в обоих цилиндрах жестко связаны.

Конструкция двухцилиндровых свободнопоршневых ДВС без жесткой связи поршней характеризуется наличием единой камеры сгорания, расположенной между поршнями. Представленная схема имеет один цилиндр, в котором поршни движутся навстречу друг

другу. Существенным преимуществом данной схемы является полная уравновешенность сил инерции, что позволяет избавиться от вибрации и шума при работе двигателя. Кроме того, единая камера сгорания позволяет нивелировать неравномерность работы по цилиндрам. Схема двигателя с противоположно движущимися поршнями предусматривает только двухтактный рабочий процесс с газообменом через впускные и выпускные окна и общей камерой сгорания и в настоящее время является наиболее оптимальной для реализации.

Контрольные вопросы

1. Назовите типы свободнопоршневых двигателей?
2. Расскажите о конструкции и работе свободнопоршневого дизель-компрессора.
3. Перечислите преимущества и недостатки СПДК и СПГГ.

Лабораторная работа № 6

ДВИГАТЕЛЬ С ПЕРЕМЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ

Цель работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.
2. Ознакомиться с причинами применения регулируемой степени сжатия.
3. Изучить методы регулирования степени сжатия.

Общие положения

Для повышения экономичности двигателей при их работе на режимах с частичной нагрузкой, необходимо повысить индикаторный коэффициент полезного действия η_i , например, путем увеличения степени сжатия ε . Это, в свою очередь, приводит к увеличению эффективного КПД, а следовательно, – к росту среднего эффективного давления P_e (рис. 6.1).

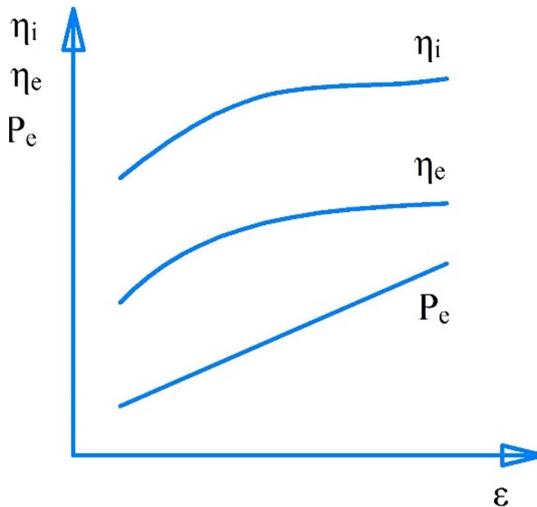


Рис. 6.1. Зависимость η_i , η_e и P_e от ε

В традиционных двигателях степень сжатия является величиной постоянной (геометрический параметр) и выбирается из следующих соображений. В двигателях с искровым зажиганием максимальная величина ϵ ограничивается детонацией, так как после возникновения детонации, помимо увеличения механических нагрузок, снижается индикаторный КПД η_i и экономичность двигателя. Выбор ϵ осуществляется на режиме с полной нагрузкой и при пониженной частоте вращения коленчатого вала (на режиме максимального крутящего момента). При этом выбранная ϵ не обеспечит наилучшую экономичность двигателя на частичных нагрузках. Поэтому на этих режимах желательно повысить степень сжатия, чтобы улучшить экономические показатели двигателя.

В дизелях максимальная величина ϵ устанавливается из условия обеспечения надежного пуска двигателя. При этом выбранная ϵ , как правило, выше той, которая соответствует наилучшей экономичности двигателя. По этой причине в дизелях после их пуска желательно снизить ϵ , особенно если дизели имеют наддув, поскольку у таких двигателей резко повышаются механические нагрузки из-за повышения максимального давления сгорания p_z .

Для изменения ϵ в зависимости от режима работы двигателя используются различные системы автоматического регулирования ϵ . Автоматическое увеличение ϵ при работе двигателей с искровым зажиганием на низких нагрузках (при дросселировании) позволяет улучшить показатели топливной экономичности и токсичности ОГ. Автоматическое снижение ϵ в дизелях, помимо улучшения экономичности, позволяет форсировать их по мощности без увеличения термомеханических напряжений. Автоматическое изменение ϵ осуществляется различными способами, например, применением поршней с автоматическим регулированием степени сжатия (ПАРСС). Фирма Continental (США) разработала конструкцию поршня (рис. 6.2), которая позволила изменять ϵ в пределах от 12 до 22 единиц при работе в широком диапазоне изменения нагрузок. Такая конструкция устанавливается в серийном многотопливном дизеле автомобильного типа Continental AVDS-1100 размерности 12,4/12,7 мощностью 810 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2800 мин⁻¹.

На рис. 6.2 видно, что конструкция автоматического поршня состоит из подвижного поршня 1 и внутренней вставки 2. Стакан

и вставка имеют между собой гидравлическую связь. Внутренняя вставка соединена с шатуном через поршневой палец. Подвижный стакан перемещается свободно относительно внутренней вставки и его положение определяется количеством перетекающего масла из масляных полостей 3 и 5. Количество перетекающего масла регулируется с помощью редукционных клапанов 4 и 7. Масло поступает в полости из смазочной системы через внутренний канал в шатуне.

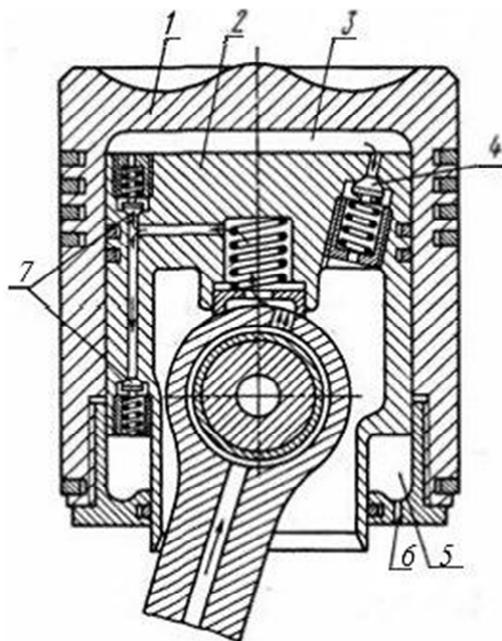


Рис. 6.2. Схема поршня дизеля Continental AVDS-1100:

1 – подвижный стакан; 2 – внутренняя вставка; 3, 5 – масляные полости;
4, 7 – клапаны; 6 – дренажное отверстие

Уменьшение ϵ на режимах номинальных нагрузок осуществляется следующим образом: давление сгорания внутри цилиндра увеличивается до определенного предела, это давление преодолевает жесткость пружины клапана 4 и последний открывается; масло из полости 3 сливается в масляный картер и подвижный поршень перемещается вниз. Увеличение ϵ на режимах с неполной нагрузкой осуществляется при движении поршня 3 вверх, когда давления сис-

темы смазки преодолевает жесткость пружины клапана 7. При использовании поршней с автоматическим регулированием степени сжатия (ПАРСС) мощность двигателя можно увеличить примерно в 2,5 раза по сравнению с мощностью двигателя с постоянной степенью сжатия.

Кроме того, холодный запуск двигателей с ПАРСС осуществляется легче, чем запуск традиционных двигателей. Однако применение автоматического регулирования степени сжатия с помощью гидравлических механизмов, обладающих определенной инерционностью, в двигателях с искровым зажиганием на переходных режимах может вызвать кратковременную детонацию из-за некоторого отставания в изменении ϵ при изменении режима двигателя. В связи с этим в двигателях с искровым зажиганием лучше использовать пневматические приводы, имеющие более высокую чувствительность.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о причинах применения регулируемой степени сжатия.
2. Назовите критерии выбора геометрической степени сжатия для ДВС.
3. Перечислите методы регулирования степени сжатия.
4. Расскажите о работе поршней с автоматическим регулированием степени сжатия.

Лабораторная работа № 7

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА

Цель работы:

1. Ознакомиться с классификацией топлив.
2. Изучить альтернативные виды топлив для ДВС.
3. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки альтернативных топлив.

Общие положения

Чем больше в мире производится автомобилей, тем значительно интерес к альтернативным видам топлива, при сгорании которых выделяется меньше вредных веществ. Во многих странах все более популярным становится биологическое топливо, изготавливаемое из растительного сырья: рапса, конопли, бананов, бобовых, цитрусовых. В шести государствах ЕС, а также в США, Канаде, Бразилии, Малайзии такое биологическое топливо производят в промышленных масштабах, но все же его доля в топливном балансе не превышает 0,3 %.

В обозримом будущем двигатель внутреннего сгорания останется основной движущей силой автомобиля. В связи с этим единственный путь решения энергетической проблемы автомобильного транспорта – это создание альтернативных видов топлива. Новое горючее должно удовлетворить очень многие требования: иметь необходимые сырьевые ресурсы, низкую стоимость, не ухудшать работу двигателя, выбрасывать как можно меньше вредных веществ, по возможности сочетаться со сложившейся системой снабжения топливом и др.

Нефть сегодня – основной и наиболее востребованный энергоресурс. В последнее время большое количество зарубежных научно-исследовательских центров моторостроительных фирм проводят исследования, направленные на экономию топлива и замену традиционных жидких углеводородных топлив новыми видами. Альтернативные виды топлива можно классифицировать следующим образом:

- по составу: спирты, эфиры, эстеры, водородные топлива, топлива с добавками;
- по агрегатному состоянию: жидкие, газообразные, твердые;
- по объемам использования: как основное топливо, в качестве добавок;

– по источникам сырья: из угля, торфа, сланцев, биомассы, горючего газа, электроэнергии и др.

К альтернативным видам топлива относятся:

1. Природный газ.

Природный газ в большинстве стран является наиболее распространенным видом альтернативного моторного топлива. Природный газ в качестве моторного топлива может применяться как в виде сжатого, сжатого до давления 200 атмосфер, газа, так и в виде сжиженного, охлажденного до $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ газа. В настоящее время наиболее перспективным является применение сжиженного газа (пропан-бутан). В Европе это топливо называется LPG (Liquefied petroleum gas – сжиженный бензиновый газ). В то время как сжатый газ (метан) находится в баках под давлением 200 бар, что само по себе представляет повышенную опасность, LPG сжижается при давлении 6–8 бар. В Европе сегодня насчитывается около 2,8 млн машин, работающих на LPG.

2. Газовый конденсат.

Использование газовых конденсатов в качестве моторного топлива сведено к минимуму из-за следующих недостатков: вредное воздействие на центральную нервную систему, недопустимое искрообразование в процессе работы с топливом, снижение мощности двигателя (на 20 %), повышение удельного расхода топлива.

3. Диметилэфир.

Диметилэфир является производной метанола, который получается в процессе синтетического преобразования газа в жидкое состояние. Существуют разработки по переоборудованию дизельных двигателей под диметилэфир. При этом существенно улучшаются экологические характеристики двигателя.

В отличие от сжиженного природного газа, диметилэфир менее конкурентоспособен, в основном по причине того, что теплотворная способность на тонну диметилэфира на 45 % ниже теплотворности на тонну сжиженного природного газа. Также для производства диметилэфира требуется не только более высокий уровень предварительных капиталовложений, но и больший объем сырьевого газа для производства продукта с эквивалентной теплотворной способностью.

4. Синтетический бензин.

Сырьем для его производства могут быть уголь, природный газ и другие вещества. Наиболее перспективным считается синтезиро-

вание бензина из природного газа. Из 1 м³ синтез-газа получают 120–180 г синтетического бензина. За рубежом производство синтетических моторных топлив из природного газа освоено в промышленном масштабе. Однако в настоящее время синтетические топлива из природного газа в 1,8–3,7 раза (в зависимости от технологии получения) дороже нефтяных.

5. Электрическая энергия.

Заслуживает внимания применение электроэнергии в качестве энергоносителя для электромобилей. Кардинально решается вопрос, связанный с токсичностью отработанных газов, появляется возможность использования нефти для получения химических веществ и соединений. К недостаткам электроэнергии как вида электроносителя можно отнести: ограниченный запас хода электромобиля, увеличенные эксплуатационные расходы, высокая первичная стоимость, высокая стоимость энергоемких аккумуляторных батарей.

6. Топливные элементы.

Топливные элементы – это устройства, генерирующие электроэнергию непосредственно на борту транспортного средства, – в процессе реакции водорода и кислорода образуются вода и электрический ток. В качестве водородосодержащего топлива, как правило, используется либо сжатый водород, либо метанол. К недостаткам применения топливных элементов следует отнести повышенную взрывоопасность водорода и необходимость выполнения специальных условий его хранения, а также высокую себестоимость получения водорода.

7. Биодизельное топливо.

Применение биодизельного топлива связано, в первую очередь, со значительным снижением эмиссии вредных веществ в отработанных газах (на 25–50 %), улучшением экологической обстановки в регионах интенсивного использования дизелей (города, реки, леса, открытые разработки угля (руды), помещения парников и т. п.) – содержание серы в биодизельном топливе составляет 0,02 %.

8. Биогаз.

Биогаз как альтернативный энергоноситель может служить высококалорийным топливом, улучшая технико-эксплуатационные и экологические параметры ДВС транспорта и стационарных энергоустановок. Биогаз, представляющий собой продукты брожения отходов биологической деятельности человека и животных, содер-

жит приблизительно 68 % CH_4 , 2 % H_2 и до 30 % CO_2 . После отмывки от углекислоты этот газ является достаточно однородным топливом, содержащим до 80 % метана с теплотворной способностью более 25 МДж/м³. Применение биогаза в качестве топлива для ДВС осуществляется путем использования серийно выпускаемой топливной аппаратуры для природного газа с коррекцией соотношения «топливо-воздух».

При переработке 1 т свежего навоза крупного рогатого скота и свиней можно получить 45–60 м³ биогаза, 1 т куриного помета – до 100 м³, из различных видов энергетических растений – 100–500 м³. По теплоте сгорания 1 м³ биогаза равен: 0,8 м³ природного газа, 0,7 кг мазута, 0,6 кг бензина, 1,5 кг дров, 3 кг навозных брикетов.

9. Отработанное масло.

В настоящее время на ряде предприятий различных стран мира весьма эффективно работают установки, преобразующие отработанное масло (моторное, трансмиссионное, гидравлическое, промышленное, трансформаторное, синтетическое и т. д.) в состояние, которое позволяет полностью использовать его в качестве дизельного или печного топлива. Установка подмешивает высокоочищенные (в установке) масла в соответствующее топливо, в точно заданной пропорции, с образованием навсегда стабильной, неразделяемой топливной смеси. Полученная смесь имеет более высокие параметры по чистоте, обезвоживанию и теплотворной способности, чем дизельное топливо до его модификации в установке.

10. Водород как альтернативное топливо.

Водород является эффективным аккумулятором энергии. Применение водорода в качестве топлива возможно в разнообразных условиях, что может дать существенный вклад в мировую энергетику, когда ресурсы ископаемого топлива будут близки к полному истощению. По сравнению с бензином и дизельным топливом водород более эффективен и меньше загрязняет окружающую среду. Взрывоопасность водорода резко снижается с применением специальных присадок (например, добавка 1 % пропилена делает H_2 безопасным).

Водород как топливо в настоящее время применяют в Европе, Китае, Японии и других странах.

11. Спирты.

Среди альтернативных видов топлива в первую очередь следует отметить спирты, в частности метанол и этанол, которые можно

применять не только как добавку к бензину, но и в чистом виде. Их главные достоинства – высокая детонационная стойкость и короткий КПД рабочего процесса, недостаток – пониженная теплоотворная способность, что уменьшает пробег между заправками и увеличивает расход топлива в 1,5–2 раза по сравнению с бензином. Кроме того, из-за плохой испаряемости метанола и этанола затруднен запуск двигателя.

Использование спиртов в качестве автомобильного топлива требует незначительной переделки двигателя. Например, для работы на метаноле достаточно произвести специальную регулировку системы питания топливом, установить устройство для стабилизации запуска двигателя и заменить некоторые подверженные коррозии материалы более стойкими. Учитывая ядовитость чистого метанола, необходимо предусмотреть тщательную герметизацию топливоподающей системы автомобиля.

Метанол может смешиваться с бензином и служить основой для эфирной добавки – метилтретбутилового эфира, который в настоящее время замещает в США большее количество бензина и сырой нефти, чем все другие альтернативные топлива вместе взятые.

12. Генераторный древесный газ.

Газ получают из таких отходов деревообрабатывающей промышленности, как опилки, обрезки, древесной щепы, стружки и т. д., а также деревянных чурок. Этот газ получается путем превращения органической части твердых отходов в горючий газ при высоком температурном (1000–2000 °С) взаимодействии с окислителем (O₂, воздух, водяным паром). Этот процесс называется газификацией и проходит в газогенераторах.

При использовании его в качестве топлива для ДВС, газ охлаждают и очищают. У автомобиля при этом снижается грузоподъемность, скорость и мощность.

Контрольные вопросы

1. Обоснуйте необходимость разработки и применения альтернативных топлив.
2. Перечислите известные вам виды альтернативных топлив.
3. В чем достоинства альтернативных топлив?

Лабораторная работа № 8

ВОДОРОД – КАК ТОПЛИВО

Цель работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки необходимых свойств водорода как моторного топлива и его перспективности.
2. Ознакомиться с основными свойствами водорода.

Общие положения

Первый элемент периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева. Относительная атомная масса 1,0079. Существуют два стабильных изотопа водорода – ^1H (протий) и ^2H (дейтерий), а также один радиоактивный – ^3H (тритий). В свободном состоянии и при нормальных условиях водород – бесцветный газ, без запаха и вкуса. Обычно существует в комбинации с другими элементами, например, кислорода в воде, углерода в метане и в органических соединениях. Поскольку водород химически чрезвычайно активен, он редко присутствует как несвязанный элемент.

Охлажденный до жидкого состояния водород занимает 1/700 объема газообразного состояния. Водород при соединении с кислородом имеет самое высокое содержание энергии на единицу массы – 120,7 гДж/г. При сжигании в чистом кислороде единственные продукты – высокотемпературная теплота и вода. Таким образом, при использовании водорода не образуются парниковые газы, и даже не нарушается круговорот воды в природе.

Водород – самый распространенный элемент во вселенной. Он преимущественно составляет межзвездное вещество, формирует основную массу звезд. Солнце, по меньшей мере, наполовину состоит из водорода. Собственно, звезды светят благодаря непрерывному термоядерному «сгоранию» водорода в их недрах и превращению его в инертный гелий.

При обычных условиях водород – газ без цвета и запаха, почти в 15 раз легче воздуха. Обладает очень высокой теплопроводностью, сравнимой с теплопроводностью металлов. Это происходит из-за легкости молекул водорода и, следовательно, большой скорости их

движения. Водород хорошо растворяется в некоторых металлах: в одном объеме палладия, например, растворяется до 900 объемов водорода. В соотношении 2 : 1 с кислородом образует взрывчатый гремучий газ. Температура сгорания водорода чрезвычайно высока – 2800 °С. Водород является великолепным восстановителем.

Применяют водород для производства аммиака, карбамида и метанола, а также в нефтехимической промышленности. В пищевой промышленности его используют для превращения жидких жиров в твердые (их гидрогенизации). Высокая температура горения, а в сочетании с электрической дугой она достигает 4000 °С, обеспечивает плавление даже самых тугоплавких металлов. Поэтому кислородно-водородные горелки используют для сварки и резки металлов. В цветной металлургии восстановлением водородом получают особо чистые металлы из оксидов. В космической технике как топливо для самых мощных ракет-носителей.

Интерес к водороду как моторному топливу обусловлен следующими обстоятельствами:

- при сгорании водорода в двигателе образуется практически только вода, и в этом отношении двигатель на водородном топливе является наиболее экологически чистым;

- высокие энергетические свойства водорода – низшая теплота сгорания водорода составляет 120 МДж/кг, что примерно в 2,7 раза выше по сравнению с бензином (43,5–44 МДж/кг), т. е. 1 кг водорода эквивалентен почти 3 кг бензина;

- практически неограниченная сырьевая база при условии получения водорода из воды.

Использование водорода в качестве моторного топлива для автомобилей может осуществляться по нескольким вариантам:

- применение водорода как основного топлива;
- применение водорода совместно с традиционными нефтяными топливами;

- использование водорода как топлива в топливных элементах.

При высокой массовой энергоплотности объемная энергоплотность водорода на 15–20 % ниже по сравнению с бензином. С воздухом водород устойчиво воспламеняется в широком диапазоне концентраций вплоть до $\alpha = 10$, что обеспечивает устойчивую работу двигателя на всех скоростных режимах в широком диапазоне из-

менения состава смеси от $\alpha = 0,2$ до $\alpha = 5$. Критическая степень сжатия при стехиометрическом водородо-воздушном составе смеси не превышает 4,7, что соответствует октановому числу по исследовательскому методу 46 единицам, в то время как при $\alpha = 3,5$ степень сжатия достигает 9,4 и октановое число равно 114. Таким образом, при достаточном обеднении смеси возможна работа водородного двигателя в широком диапазоне степеней сжатия без детонации.

Высокая температура самовоспламенения водородо-воздушных смесей затрудняет использование этого топлива в дизельных двигателях. Устойчивое воспламенение может быть обеспечено принудительным поджиганием от свечи зажигания или организацией работы по газодизельному процессу.

Технические трудности при использовании и высокая стоимость водорода привели к тому, что уделяется внимание разработке комбинированного топлива бензин-водород. Высокая активность водорода позволяет обеспечить работу двигателя на обедненных смесях, степень обеднения которых зависит от количества водорода в смеси (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Коэффициент избытка воздуха

Содержание водорода, % масс	0	10	20	40	100
α	1,12	1,67	2,5	3,34	5,0

Проведенные испытания показали, что использование бензо-водородных смесей позволяет вдвое снизить расход бензина при скорости 90–120 км/ч и на 28 % при езде в городе.

Определенные сложности использования водорода в качестве моторного топлива создает его высокая взрыво- и пожароопасность. Однако высокая температура воспламенения (590 °С) и быстрое рассеивание в атмосфере позволяют приравнивать водород по показателям пожаро- и взрывоопасности к природному газу.

Широкие пределы воспламенения водорода делают его идеальным горючим для двигателей. Скорость сгорания водородо-воздушной смеси в двигателе в 3 раза больше, чем изооктановой воздуш-

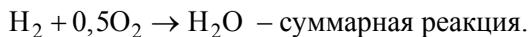
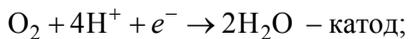
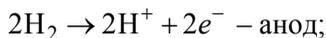
ной смеси, при этом значительно более высокий термический КПД. Двигатель на водороде может быть сконструирован с очень большой выходной мощностью, без радикальных изменений известных инженерных решений и в отношении конструкции, и в отношении системы зажигания. Двигатель внутреннего сгорания на водородном горючем позволяет использовать зажигание посредством накала вместо дорогостоящего искрового зажигания. Водородное горючее имеет еще и то преимущество, что не дает двигателю углеродных или свинцовых отложений, продукты сгорания химически не агрессивны, поэтому износ двигателя и расход масла в процессе эксплуатации заметно снижается.

Водородный двигатель легче запускается, летучесть водорода в сочетании с его воспламеняемостью делают его незаменимым горючим в условиях полярного холода. Термический КПД при работе двигателей внутреннего сгорания на водороде возрастает при увеличении степени сжатия (при $\varepsilon = 5,45$ $\eta = 37,5$ %, а при $\varepsilon = 7$ $\eta = 43$ %). Реализация любой схемы использования водорода в двигателях внутреннего сгорания зависит от создания экономичной, гибкой в использовании системы хранения водорода.

Если максимальное значение эффективного КПД двигателя при работе на водороде выше, чем при работе на бензине, то эффективная мощность заметно падает. Последнее обусловлено очень низкой плотностью водорода, что приводит к уменьшению наполнения двигателя топливом. В целом перевод на водород вызывает снижение мощности двигателя в среднем на 20–25 %. Наряду с этим применение водорода ведет к существенному увеличению эмиссии оксидов азота с ОГ, основной причиной которого является повышение температуры и скорости сгорания.

Еще одна существенная особенность применения водорода связана с возможностью прямого преобразования энергии химической реакции в электрическую при его соединении с кислородом в электрохимическом генераторе (ЭХГ) с высоким коэффициентом полезного действия. Топливный элемент – гальваническая ячейка, вырабатывающая электроэнергию за счет окислительно-восстановительных превращений реагентов, поступающих извне. При работе топливного элемента электролит и электроды не расходуются, не претерпевают каких-либо изменений. В нем химическая энергия топлива непосредственно превращается в электроэнергию. В простейшем топ-

ливном элементе, где используются чистый водород и чистый кислород, на аноде происходит разложение водорода и его ионизация:



Топливный элемент состоит из ионного проводника (электролита) и двух электронных проводников (электродов), находящихся в контакте с электролитом, который осуществляет перенос заряда ионами водорода. Топливо и окислитель непрерывно подводятся к электродам – аноду и катоду, продукты (инертные компоненты и остатки окислителя, а также продукты окисления) непрерывно отводятся от них. Из молекулы водорода образуются два иона водорода и два электрона. На катоде водород соединяется с кислородом и возникает вода. Фактически в этом и состоит главный экологический выигрыш: в атмосферу выбрасывается водяной пар вместо огромного количества углекислого газа, образующегося при работе традиционных тепловых электростанций.

Главное препятствие к внедрению водородного автомобиля на топливных элементах – отсутствие инфраструктуры промышленного получения водорода в нужных объемах, систем его хранения, транспортировки и заправки автомобилей. По мнению американских специалистов, такую инфраструктуру удастся создать не раньше, чем в 2020–2030 гг. На переходный период ведущие автопроизводители предложат так называемые «гибридные автомобили»: в них экономичный двигатель внутреннего сгорания подзаряжает аккумуляторную батарею, которая питает электрический двигатель. Такие автомобили разрабатывают практически все ведущие автомобильные компании и уже серийно выпускают в Японии.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные свойства водорода как моторного топлива.
2. Какие требования предъявляются к системе питания топливом при использовании водорода?
3. Назовите способы применения водорода в качестве топлива на мобильных машинах.

Лабораторная работа № 9

ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЙ АВТОМОБИЛЬ

Цель работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемого технического решения.
2. Ознакомиться с особенностями конструкции газогенераторного автомобиля.
3. Ознакомиться с этапами газификации органического сырья в газогенераторе.

Основные положения

Большой интерес представляет применение в качестве сырья для производства генераторного древесного газа таких отходов деревообрабатывающей промышленности, как опилки, обрезки, древесная щепа, стружки и т. д., а также деревянные чурки. Этот газ получается путем превращения органической части твердых отходов в горючий газ при высоком температурном режиме (при $t = 1000\text{--}2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) при взаимодействии с окислителем (O_2 , воздухом, или водяным паром). Этот процесс называется газификацией и проходит в газогенераторах. Для производства генераторного газа используется в основном генератор с обращенным процессом газификации, схема которого представлена на рис. 9.1.

Генератор представляет собой шахту, внутренние стенки которой изготовлены из жаропрочного материала. Сверху в бункер загружается топливо, а для обеспечения обращенного потока с двух сторон генератора в разные его зоны через диффузоры подается воздух. Слой топлива поддерживается качающей колосниковой решеткой. Внутреннюю полость генератора условно можно разделить на четыре зоны.

В зоне I осуществляется горение отходов древесины и протекают экзотермические реакции с выделением CO_2 и воды. Кроме того, частично протекают реакции образования CO с последующим окислением его в CO_2 . Под действием выделяемой теплоты температура

в зоне горения достигает 1200–1500 °С, в результате чего разогревается верхний слой топлива, относящийся к зоне II.

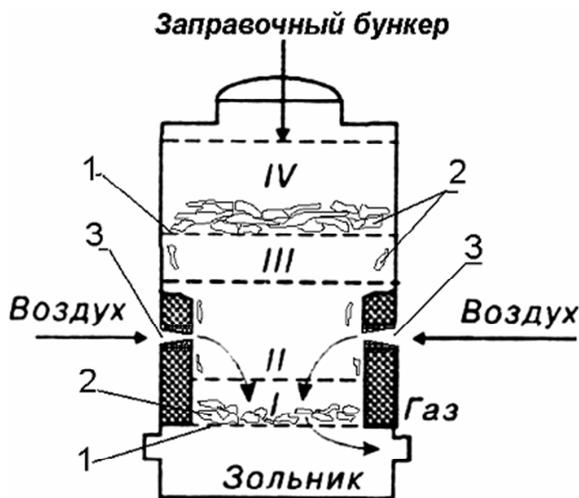


Рис. 9.1. Генератор с обращенным процессом газификации:
 I – зона горения; II – зона газификации (восстановления); III – зона сухой перегонки;
 IV – зона подсушки; 1 – качающая колосниковая решетка;
 2 – отходы древесины; 3 – диффузор

В зоне II происходит газификация топлива (восстановление). Здесь протекают эндотермические реакции с образованием горючих компонентов газа CO и частично метана. Вследствие этого температура во второй зоне снижается до 900–1000 °С. Если температура становится ниже 900 °С, процесс газификации топлива нарушается. В зоне III сухой перегонки горячие газообразные компоненты воздействуют на твердое топливо. Поскольку кислорода в зоне реакции практически нет, процесс сухой перегонки протекает с выделением из топлива паров воды, газов и смолистых веществ, которые подмешиваются к газу. Температура в этой зоне снижается до 300–900 °С.

В зоне подсушки IV происходит сушка самого верхнего слоя отходов древесины за счет передачи теплоты от нижней зоны (конвекции). Температура газов в этой зоне достигает 105–300 °С, из топлива выделяются только пары воды, которые смешиваются с генераторным газом.

В результате газификации твердого топлива получается сырой генераторный газ, содержащий CO, H₂, CH₄, CO₂, H₂O (табл. 9.1) и смолистые вещества. Температура газа на выходе из газогенераторной установки превышает 100 °С и несет с собой различные твердые частицы. Поэтому каждая газогенераторная установка включает в себе аппаратуру для очистки и охлаждения газа. Из табл. 9.1 следует, что генераторный газ, полученный из дров, обладает сравнительно высокой теплотой сгорания по отношению к другим твердым топливам, которые также можно использовать в качестве сырья в газогенераторе.

Таблица 9.1

Состав генераторного газа

Топливо	Состав газа, % по объему						Теплота сгорания, кДж/м ³
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	
Дрова	28,5	14,0	3,5	8,0	0,5	45,5	5861
Древесный уголь	30,5	12,0	2,3	5,0	0,2	50,0	5778
Формовочный торф	28,0	15,0	3,0	8,0	0,4	45,6	6280
Донецкий антрацит	27,5	13,5	0,5	5,5	0,2	52,8	5024
Подмосковный уголь	25,0	14,0	2,2	6,5	0,2	52,1	4731

В СССР выпускались газогенераторные автомобили ГАЗ-42 и ЗИС-21 (рис. 9.2), имеющие массу снаряженной газогенераторной установки соответственно 360 и 600 кг. При этом мощность двигателя ЗИС-21 по сравнению с базовым ЗИС-5 снизилась на 35 % (даже при увеличенной степени сжатия), грузоподъемность – с 3000 до 2500 кг, а максимальная скорость – с 60 до 50 км/ч. Расход топлива составил примерно 90 кг древесных чурок на 100 км пробега. Следует также отметить сложность эксплуатации таких автомобилей.

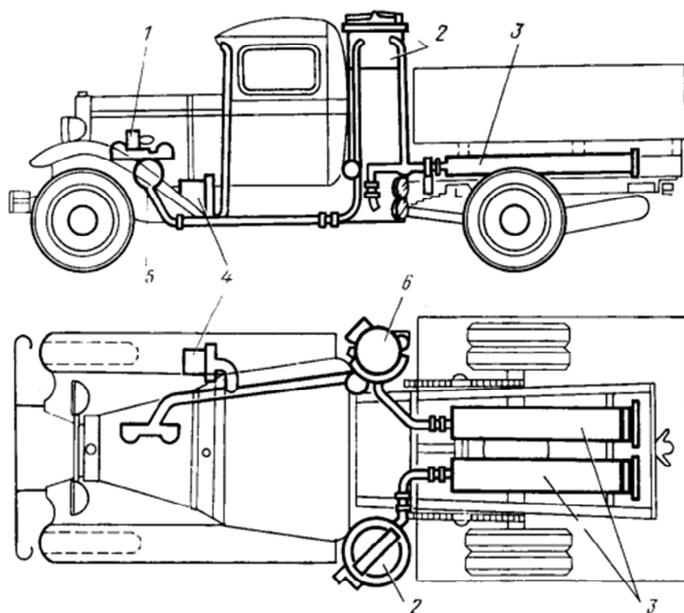


Рис. 9.2. Газогенераторный автомобиль ГАЗ-42:

1 – вспомогательный карбюратор; 2 – газогенератор; 3 – очиститель-охладитель; 4 – вентилятор для розжига генератора; 5 – смеситель; 6 – тонкая очистка газа

Несмотря на указанные недостатки, генераторные двигатели обладают бесспорным преимуществом – способностью работать на доступном и дешевом топливе, особенно в труднодоступных местах, где отсутствует производство жидких нефтяных топлив. Таким образом, можно решить ряд проблем, связанных с наземным транспортом и средствами механизации для сельского хозяйства.

Применение генераторного древесного газа в деревообрабатывающей промышленности может решить вопросы, связанные с теплоснабжением производственных площадей, зданий, получения горячей воды.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о конструкции газогенератора.
2. Расскажите о системе питания топливом.
3. Перечислите свойства генераторного газа как моторного топлива.

Лабораторная работа № 10

ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Цель работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемого технического решения.
2. Изучить конструкции и работы топливного элемента (ТЭ).
3. Оценить возможности применения ТЭ для АТС.

Общие положения

Топливный элемент (электрохимический генератор) – это устройство, обеспечивающее прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую в процессе электрохимической реакции. Хотя то же самое происходит в электрических аккумуляторах, топливные элементы имеют два важных отличия: 1) они функционируют до тех пор, пока топливо и окислитель поступают из внешнего источника; 2) химический состав электролита в процессе работы не изменяется, т. е. топливный элемент не нуждается в перезарядке.

При использовании чистого водорода в качестве топлива продуктами реакции, помимо электрической энергии, являются теплота и вода (или водяной пар), т. е. в атмосферу не выбрасываются газы, вызывающие загрязнение окружающей среды. Если используется водородосодержащее сырье, например, природный газ, побочным продуктом реакции будут и другие газы, например, оксиды углерода и азота, однако их количество значительно ниже, чем при прямом сжигании такого же количества природного газа.

Виды ТЭ

Существуют различные виды ТЭ. Их обычно классифицируют по используемому топливу, рабочему давлению и температуре, что определяет область их применения, КПД, вид топлива и тип катализатора, используемый в ТЭ. Наибольшее распространение получила классификация топливных элементов по типу электролита как среды для внутреннего переноса ионов (протонов). Электролит между

электродами определяет операционную температуру и от этой температуры зависит тип катализатора. Выбор топлива и окислителя, подаваемых в ТЭ, определяется, в первую очередь, их электрохимической активностью (то есть скоростью реакции на электродах), стоимостью, возможностью легкого подвода топлива и окислителя в ТЭ и отвода продуктов реакции из ТЭ. Водород считается основным источником топлива для ТЭ, однако процесс преобразования топлива позволяет извлекать водород и из других его видов, включая метанол, природный газ, нефть и др. В настоящее время известно несколько типов топливных элементов, различающихся составом использованного электролита.

Во многом именно температура определяет область применения топливных элементов. Например, высокая температура критична для ноутбуков, поэтому для этого сегмента рынка разрабатываются топливные элементы с ионообменной мембраной, отличающиеся низкими рабочими температурами. Для автономного энергоснабжения зданий необходимы топливные элементы высокой установочной мощности, и при этом имеется возможность использования тепловой энергии, поэтому для этих целей могут использоваться и топливные элементы других типов.

Для автомобильной промышленности наиболее оптимальными являются PEMFC, SOFC, DMFC и DEFC:

1. Топливные элементы с ионообменной мембраной (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)/твердо-полимерные ТЭ (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells) – PEMFC.

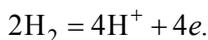
2. Твердотельные оксидные топливные элементы (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC).

3. Топливные элементы с прямым окислением метанола (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC), топливные элементы с прямым окислением этанола (Direct Ethanol Fuel Cells, DEFC).

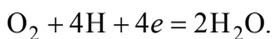
Твердо-полимерные топливные элементы, называемые также ТЭ с ионообменной мембраной, обеспечивают высокую мощность и обладают низким весом и объемом по сравнению с другими топливными элементами. Отличительной особенностью этих элементов является применение графитовых электродов и твердополимерного электролита (или, как его еще называют, ионообменной мембраны – Proton Exchange Membrane (PEM)). В качестве топлива в PEM-эле-

ментах используется чистый водород, а роль окислителя выполняет содержащийся в воздухе кислород.

Водород подается со стороны анода, где происходит электрохимическая реакция:



Ионы водорода перемещаются от анода к катоду через электролит (ионный проводник), в то время как электроны – через внешнюю цепь. На катоде, со стороны которого подается окислитель (кислород или воздух), происходит реакция окисления водорода с образованием чистой воды:



Одна ячейка РЕМ – элемента (рис. 10.1), состоящая из пары электродов и ионообменной мембраны, способна генерировать напряжение порядка 0,7В. Для увеличения выходного напряжения массив отдельных ячеек соединяется в батарею.

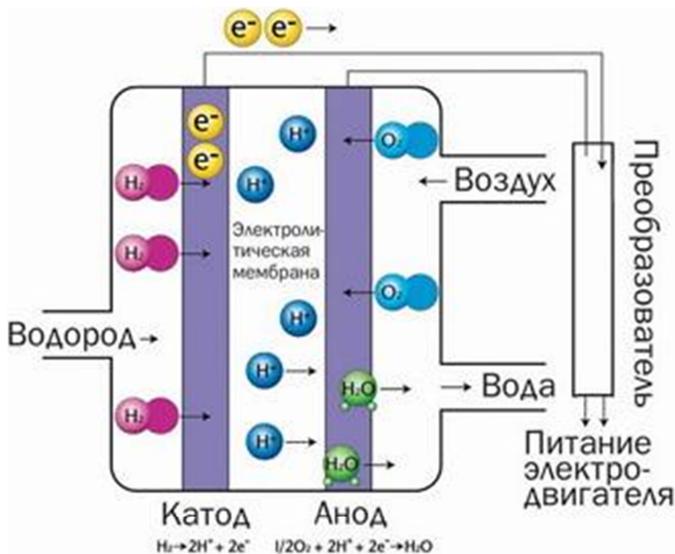


Рис. 10.1 Схема устройства PEMFC

Рабочая температура PEM-элементов составляет около 80 °С. При таких условиях электрохимические реакции протекают слишком медленно, поэтому в конструкции элементов данного типа используется катализатор – обычно тонкий слой платины на каждом из электродов.

Существует несколько ограничений, препятствующих более широкому распространению данной технологии. Это относительно высокая стоимость материалов для изготовления мембран и катализатора. Кроме того, в качестве топлива можно использовать только чистый водород.

Эти топливные элементы отличаются высокой удельной мощностью, позволяют быстро регулировать выходную мощность, могут быть быстро активированы. Недостаток этого типа элементов – высокие требования к качеству топлива, поскольку загрязненное топливо может вывести из строя мембрану.

Водород – единственный на сегодняшний день вид топлива, позволяющий производить низкоэмиссионные автомобили, особенно если водород при этом производится из возобновляемых источников. Использование водорода как транспортного топлива может уменьшить зависимость от нефти, мировые запасы которой ежегодно существенно уменьшаются. Система ТЭ, использующая чистый водород, – относительно простая, она имеет лучшие характеристики, более эффективно работает и обладает самой длительной продолжительностью работы. Также, несмотря на свою репутацию, водород абсолютно нетоксичен, и его использование достаточно безопасно.

Одно из главных препятствий, связанное с использованием водорода в автомобилях, – это обеспечение его безопасного хранения в необходимых количествах на борту. Водород может храниться в виде сжатого газа, в виде криогенной жидкости или в виде гидридов металлов.

Контрольные вопросы

1. Опишите принцип работы топливного элемента.
2. Какие виды топлив применяют в ТЭ?
3. Перечислите типы ТЭ, которые могут быть использованы в настоящее время на АТС.

Лабораторная работа № 11

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ РОТОРНО-ЛОПАСТНЫХ МАШИН

Цель работы:

1. Приобрести навыки самостоятельной критической оценки работоспособности и перспективности рассматриваемого технического решения.
2. Изучить конструкции и работы роторно-лопастного ДВС.
3. Оценить возможности применения этого типа двигателей на наземном транспорте.

Общие положения

Схема любой роторно-лопастной машины включает в себя (рис. 11.1): 1) неподвижный цилиндр с впускными и выпускными окнами; 2) лопастную группу, совершающую вращательно-колебательное движение относительно корпуса; 3) механизм преобразования движения лопастей по заданному закону; 4) выходной (входной) вал.

В настоящее время существуют следующие виды роторно-лопастных машин): 1) тепловые двигатели как внутреннего сгорания, так и внешнего сгорания; 2) насосы гидравлические и пневматические; 3) моторы гидравлические и пневматические.

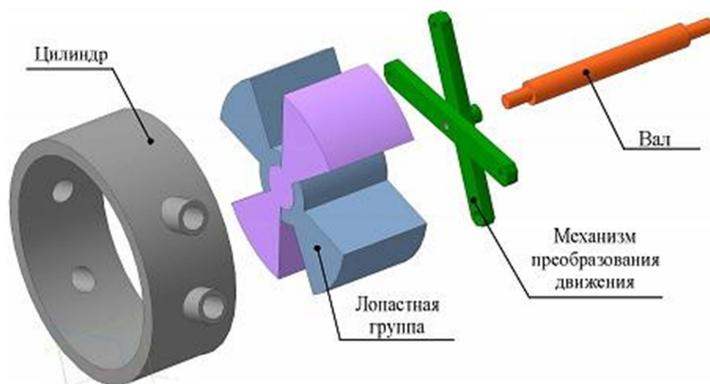


Рис. 11.1. Схема роторно-лопастной машины

Роторно-лопастной двигатель внутреннего сгорания (РЛДВС)

На двух соосных валах установлены по две лопасти, разделяющие цилиндр на четыре рабочие камеры (рис. 11.2). Каждая камера за один оборот совершает четыре рабочих такта (впуск свежего заряда, сжатие, расширение и выпуск отработавших газов). Воспламенение смеси осуществляется в верхней точке окружности от свечи зажигания.

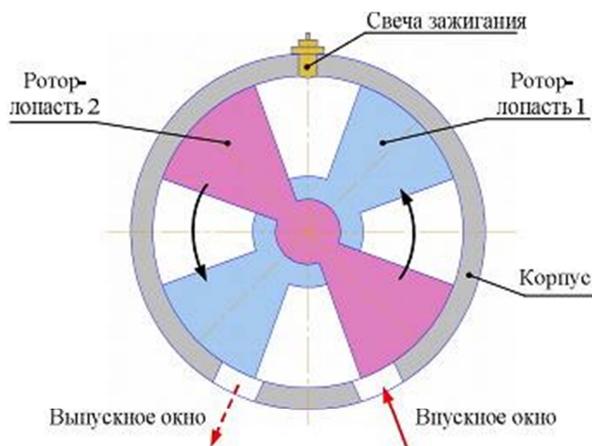


Рис. 11.2. Схема роторно-лопастного двигателя внутреннего сгорания

В качестве преимуществ РЛДВС по сравнению с поршневым ДВС приводят:

- больший эффективный КПД на 10–12 %;
- значительно лучшие массогабаритные показатели;
- простота конструкции из-за меньшего количества деталей;
- хорошая уравновешенность;
- меньшие расходы топлива и масла на угар.

Недостатком этого типа роторных двигателей является сложность создания надежного работоспособного механизма преобразования движений лопастей. Схема подразумевает снятие мощности с двух валов, каждый из которых связан со своими лопастями. При этом угловая скорость валов в пределах цикла не постоянна, т. к. валы вращаются то с положительным, то с отрицательным ускоре-

нием (одна из пар лопастей то догоняет, то отстает от другой пары). Снятие мощности с пульсирующих валов затруднительно и требует согласования движений валов. Согласование выполняется довольно сложным и громоздким механизмом. В созданных прототипах механизмы согласования быстро разрушались из-за действия больших инерционных сил.

Роторно-лопастной двигатель с внешним подводом теплоты (РЛДВПТ)

Принцип работы РЛДВПТ (рис. 11.3) следующий. В корпусе роторно-лопастной группы предусмотрены окна для соединения трубопроводами с нагревателем и охладителем. Корпус заполнен рабочим телом (газом) под начальным избыточным давлением. В четырех рабочих объемах одновременно осуществляются такты термодинамического цикла Стирлинга: впуск, сжатие, подвод теплоты, рабочий ход, выпуск, отвод теплоты.

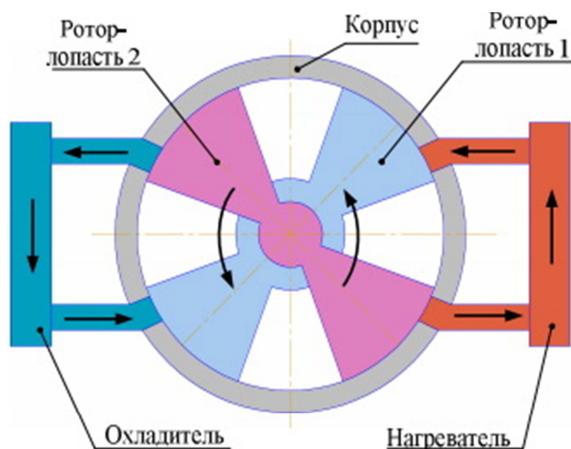


Рис. 11.3. Схема роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты

Роторно-лопастная паровая машина

Принцип работы роторно-лопастной паровой машины (рис. 11.4) следующий. Вода непрерывно поступает в котел, где происходит ее

нагрев до парообразного состояния. Далее пар по внутреннему трубопроводу поступает в рабочие камеры двигателя. Пар, находящийся под высоким давлением, оказывает давление на смежные лопасти каждой рабочей камеры. Возникающие в результате этого разности давлений заставляют роторы вращаться. При повороте ротора лопасть каждой рабочей камеры переходит точку расположения соответствующего выпускного окна, вследствие чего происходит очистка этой камеры. Далее цикл повторяется.

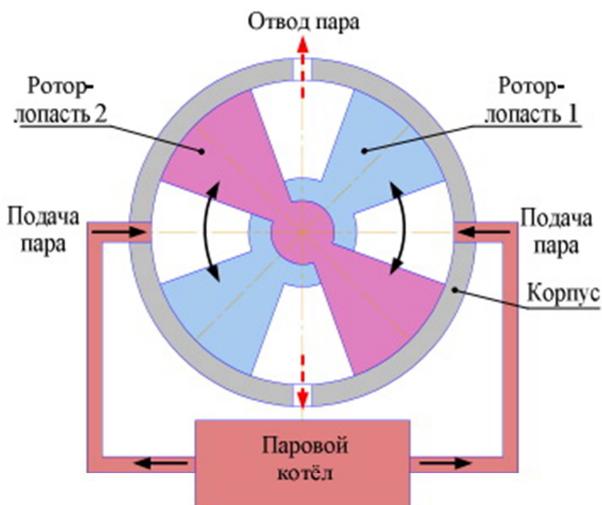


Рис. 11.4. Схема роторно-лопастной паровой машины

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы РЛДВС.
2. Перечислите виды роторно-лопастных машин.
3. Расскажите о преимуществах и недостатках РЛДВС.
4. Опишите принцип работы РЛДВПТ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Альтернативные схемы двигателей : пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / сост. : В. В. Альферович. – Минск : БНТУ, 2022. – 49 с.
2. Чириков, К. Ю. Необычные двигатели / К. Ю. Чириков. – М. : «Знание», 1976. – 64 с.
3. Уокер, Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга : пер. с англ. / Г. Уокер. – М. : Энергия, 1978. – 152 с.: ил.
4. Кутенев, В. Ф. Управление движением поршней – неиспользованный резерв улучшения мощностных и экономических показателей дизеля / В. Ф. Кутенев, М. А. Зленко, Г. Г. Термкртичьян // Автомобильная промышленность. – 1998. – № 11. – С. 25–29.
5. Спирт как автомобильное топливо [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://700ml.ru/alcohol_as_fuel.html. – Дата доступа: 10.10.2023.
6. Самые необычные конструкции двигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.drom.ru/info/misc/79118.html>. – Дата доступа: 10.10.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа № 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЯ М-14В26	4
Лабораторная работа № 2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ М-14В26.....	13
Лабораторная работа № 3. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА, УЗЛЫ И АГРЕГАТЫ ДВИГАТЕЛЯ ГТД-350	17
Лабораторная работа № 4. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	23
Лабораторная работа № 5. СВОБОДНОПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ	29
Лабораторная работа № 6. ДВИГАТЕЛЬ С ПЕРЕМЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ	34
Лабораторная работа № 7. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА	38
Лабораторная работа № 8. ВОДОРОД – КАК ТОПЛИВО	43
Лабораторная работа № 9. ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЙ АВТОМОБИЛЬ.....	48
Лабораторная работа № 10. ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ.....	52
Лабораторная работа № 11. КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ РОТОРНО-ЛОПАСТНЫХ МАШИН	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	60

Учебное издание

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СХЕМЫ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 01
«Двигатели внутреннего сгорания»

АЛЬФЕРОВИЧ Владимир Викентьевич
БЕТЬ Сергей Геннадьевич

Редактор *П. П. Горбач*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 12.03.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,60. Уч.-изд. л. 2,66. Тираж 50. Заказ 836.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.