

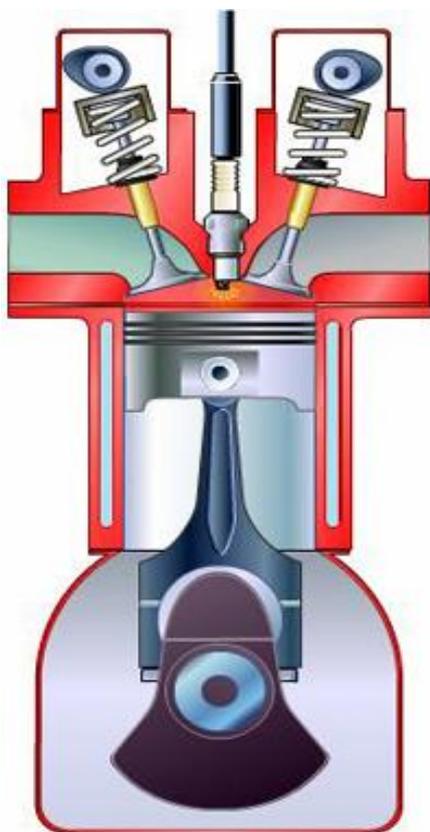
Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

Ю.П. Макушев, А.Л. Иванов

ИСТОРИЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ И ВВЕДЕНИЕ В НАПРАВЛЕНИЕ

Практикум

2-е изд., derivative



Омск • 2018

УДК 621.515.5
ББК 31.363
М17

Согласно 436-ФЗ от 29.12.2010 «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» данная продукция маркировке не подлежит

Рецензент

д-р техн. наук, проф. В.В. Шалай (ОмГТУ)

Работа утверждена редакционно-издательским советом СибАДИ в качестве практикума.

Макушев, Юрий Петрович.

М17 История двигателестроения и введение в направление [Электронный ресурс] : практикум / Ю.П. Макушев, А.Л. Иванов. – Электрон. дан. – Омск : СибАДИ, 2018. – Режим доступа:, свободный после авторизации. – Загл. с экрана.

Содержит историю создания двигателей внутреннего сгорания, их классификацию, основные термины и понятия, расчет технических характеристик, технико-экономические показатели двигателей отечественного и зарубежного производства, принцип работы двухтактных и четырехтактных двигателей.

Особое внимание уделено устройству и работе роторно-поршневых и газотурбинных двигателей, паровых машин и двигателей внешнего сгорания.

Имеет интерактивное оглавление в виде закладок.

Предназначен для бакалавров направления подготовки «Энергетическое машиностроение» профиля «Двигатели внутреннего сгорания».

Подготовлен на кафедре «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование».

Текстовое (символьное) издание ()

Системные требования : Intel, 3,4 GHz ; 150 МБ ; Windows XP/Vista/7 ;
1 ГБ свободного места на жестком диске ; программа для чтения pdf-файлов
Adobe Acrobat Reader ; Foxit Reader

Редактор Н.В. Павлова

Техническая подготовка Н.В. Кенжалинова

Издание 2-е, доривативное. Дата подписания к использованию

Издательско-полиграфический комплекс СибАДИ. 644080, г. Омск, пр. Мира, 5
РИО ИПК СибАДИ. 644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, 1

© ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2018

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «История двигателестроения и введение в направление» является составной частью цикла специальных дисциплин, она дает первоначальные сведения о выбранной специальности, предшествует изучению дисциплин «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в ДВС», «Основы научных исследований и испытаний двигателей», «Системы двигателей», «Конструирование ДВС» и других.

Целью практических занятий являются закрепление и контроль знаний, полученных на лекциях и во время самостоятельной работы. Студенты знакомятся с научными работами ведущих ученых кафедры, историей создания тепловых двигателей, их классификацией, осваивают на практике устройство и принцип работы различных по конструкции тепловых двигателей. По каждой из выполняемых практических работ студент составляет отчет и представляет его преподавателю для защиты.

При защите практических работ студент должен дать правильный ответ на поставленные контрольные вопросы. Успешное выполнение работ предполагает самостоятельную подготовку к каждой работе по конспектам лекций, основной и дополнительной литературе и настоящему практикуму.

Практическая работа № 1

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1.1. Цели и задачи практической работы

Цели практической работы: формирование и закрепление знаний по разделу «История создания тепловых двигателей».

Задачи: ознакомиться с историей создания тепловых двигателей и достижениями отечественных и зарубежных ученых, а также с историей кафедры ТД и АТЭ, структурой и составом кафедры, основными научными направлениями и научными достижениями.

1.2. История развития ДВС

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) вырабатывают более 70% мощности, используемой человеком. Мощность – работа, выполненная за единицу времени. Мощность в современных двигателях может достигать от 1 до 70 000 кВт. Мощность 70 000 кВт имеет судовой двухтактный двигатель 12 К-98 МС фирмы MAN – BMW (Германия, Дания). Диаметр поршня равен 98 см, а ход поршня – 266 см. Частота вращения коленчатого вала – 90 мин⁻¹, среднее эффективное давление – 1,8 МПа (18 бар или атм) при массе 2200 т. Удельный расход дизельного топлива составляет 170 г/(кВт·ч). Двигатель данной марки устанавливают на судах, перевозящих контейнеры.

ДВС используют на транспорте (речной, морской флот, тепловозы, грузовые и легковые автомобили), сельскохозяйственной технике (тракторы, комбайны), дорожной и строительной технике, в энергетике (стационарные и передвижные электростанции), нефтедобывающей и военной промышленности.

Первый паровой двигатель был создан в России в г. Барнауле в 1763 г. Ползуновым Иваном Ивановичем. В своих научных трактатах он писал **«огонь слугою к машинам склонить, облегчить труд по нас грядущим»** (см. приложение).

В 1816 г. шотландский священник Роберт Стирлинг предложил конструкцию двигателя внешнего сгорания (топливо сгорает вне цилиндра).

В 1823 г. в России братьями Дубиниными (Василием, Герасимом, Макаром) был запущен в г. Моздоке первый в мире завод по производству керосина.

В 1860 г. француз Лемуан Жан Этьен создал первый двигатель внутреннего сгорания. Он был двухтактным, работал на светильном газе без сжатия, имел КПД 5%.

В 1862 г. механик Николай Отто из Германии построил первый четырехтактный двигатель мощностью 1,5 кВт со сжатием газозоудушной смеси (см. приложение).

В 1886 г. Даймлер создал первый в истории автомобиль с четырехтактным двигателем мощностью 1,1 кВт при частоте вращения коленчатого вала 900 мин⁻¹.

В 1879 г. русским инженером И.С. Костовичем был спроектирован первый бензиновый двигатель мощностью 60 кВт.

В 1894 г. Рудольф Дизель продемонстрировал в работе первый двигатель с воспламенением от сжатия мощностью 2 кВт. В 1898 г. Россией был куплен патент Рудольфа Дизеля и конструкция двигателя была переработана на использование сырой нефти.

В 1898 г. инженер Романов из Петербурга демонстрировал электромобиль с питанием от аккумуляторных батарей.

С 1902 г. завод Нобеля («Русский дизель») в России приступил к производству двухтактных двигателей с клапанно-щелевой продувкой.

В 1906 г. в Москве была создана первая кафедра ДВС, ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В 1916 г. в России строятся четыре автомобильных завода АМО (Автомобильное московское общество), «Руссо-Балт» в Филях, «Русский Рено» в Рыбинске и Ярославле.

Значительная потребность в двигателях внутреннего сгорания проявилась в годы Великой Отечественной войны. Двигатели нужны были для автомобилей, самолетов, подводных лодок, танков.

В 1945 г. в СССР было выпущено 75 тысяч автомобилей. С 1941 по 1945 гг. танковая промышленность выпустила 100 тыс. боевых машин.

Автомобиль – источник прогресса, дает развитие всем сферам общества. Для дальнейшего совершенствования автомобилей и их двигателей требуются новые технологии, последние достижения науки и техники, высококвалифицированные кадры. Автомобиль не только средство передвижения, но и источник загрязнения атмосферы и представляет большую опасность для человека. Ежегодно в ДТП погибает до 30 тыс. жителей России.

В 1786 – 1790 гг. английскому механику Уатту удалось построить и приспособить паровую машину для непосредственного вращения вала. Он является автором регулятора частоты вращения. Суть изобретения заключается в том, что под действием центробежной силы грузы регулятора,

при увеличении частоты вращения вала машины, расходятся и через подвижную втулку сжимают пружину. Подвижная втулка через рычаги связана с органом регулирования, например, с дроссельной заслонкой карбюратора. С увеличением частоты вращения грузы расходятся и сдвигают втулку и заслонку в сторону уменьшения подачи топлива и наоборот. До конца XIX века паровые машины являлись практически единственными тепловыми двигателями, применявшимися в промышленности и на транспорте. Они были громоздки и малоэкономичны, но работали на любом виде топлива. Еще в начале XX века паровые машины использовали даже на автомобилях. Над совершенствованием паровых автомобилей работы продолжались и во второй половине прошлого столетия, продолжают они и в наше время в связи с поисками возможностей замены нефтяных топлив. На смену паровым машинам пришли более совершенные двигатели – паровые турбины и ДВС.

Стационарные двигатели, работавшие на керосине и тяжелых топливах, появились в период 1884 – 1890 гг. Зажигание было калоризаторным (от нагретых шаровых поверхностей). В России их называли «нефтянками». В 1890 г. в Москве завод Брамлея (позже «Красный пролетарий») начал выпуск четырёхтактных калоризаторных двигателей (воспламенение горючей смеси от нагретых шаровых тел).

В 1908 г. в России в Коломне началось производство газовых двигателей, а затем и на других заводах.

В 1892 г. Рудольф Дизель получил патент на двигатель внутреннего сгорания нового типа, рассчитанный на использование жидкого топлива (керосина). Двигатель работал на керосине, который впрыскивался в цилиндр при помощи сжатого в компрессоре воздуха. Изобретатель предложил нагревать воздух в цилиндре путём сжатия до температуры 400–500 °С, при которой распыленное впрыскиваемое топливо могло бы самовоспламеняться и сгорать по мере поступления в цилиндр, причем по его замыслу двигатель должен был работать без охлаждения стенок цилиндра. Последующий опыт не подтвердил возможность создания в то время двигателя без охлаждения цилиндров, но идея самовоспламенения топлива оказалась перспективной.

В 1898 г. Г.В. Тринклер предложил заменить компрессорное распыливание топлива механическим. В течение 1899 г. двигатель Тринклера был построен и испытан на Путиловском заводе. Двигатель имел диаметр цилиндра 205 мм, ход поршня – 350 мм, мощность – 10 л.с. при частоте вращения вала 160 мин⁻¹. Такие двигатели называли бескомпрессорными, так как топливо подавалось в камеру сгорания в распыленном виде при помощи насоса высокого давления и форсунки. Двигатель данной конст-

рукции приводил в действие генератор, который служил для освещения зимнего дворца в Санкт-Петербурге.

Двигатель с самовоспламенением смеси за счет сжатия, работающий на нефти, был построен в 1899 г. на заводе Э. Нобеля в Петербурге.

В 1926 г. созданы двигатели: «АМ» А.А. Микулина, «ВК» В.Я. Климова, «АШ» А. Д. Швецова.

В настоящее время в народном хозяйстве успешно используют газовые турбины, идея создания которых зародилась почти одновременно с первыми попытками создания поршневых двигателей внутреннего сгорания. Построена газовая турбина была только в 1897 г. по проекту русского инженера П. Д. Кузьминского. Газовые турбины широко используют в стационарных силовых установках, авиации, на водном и железнодорожном транспорте. Созданы также экономичные газотурбинные двигатели для легковых и грузовых автомобилей.

В 60-е годы прошлого века ученые настойчиво искали пути использования в качестве транспортного агрегата весьма компактный работоспособный роторно-поршневой ДВС или двигатель с вращающимся поршнем. Попытки создания простых по идее двигателей роторного типа предпринимались ещё в XIX веке, но успеха они не имели из-за трудностей уплотнения зазоров между ротором и статором. Только в 1957 г. немецкому инженеру Феликсу Ванкелю удалось создать работоспособный роторно-поршневой двигатель.

Большой вклад в развитие теории двигателей внесли русские исследователи.

Профессор МВТУ Василий Игнатьевич Гриневецкий (1871 – 1919) в 1906 г. создал методику теплового расчета двигателя, которая давала возможность определить основные размеры двигателя в соответствии с тепловыми процессами, протекающими в цилиндре. Данным методом расчета пользуются и в наши дни.

Дальнейшее уточнение и развитие методики теплового расчета провели Н. Р. Брилинг, Е.К. Мазинг, Б.С. Стечкин, А.С. Орлин.

Брилинг Николай Романович (1876 – 1961) – основоположник теории автотракторных двигателей, специализировался на расчёте теплопередачи в деталях двигателя.

Мазинг Евгений Карлович (1880 – 1944) – ученик и последователь Гриневецкого В.И., усовершенствовал методику теплового расчета, исследовал вопросы генерирования газа и его использования в двигателях.

Стечкин Борис Сергеевич (1891 – 1969) – ученик Жуковского Н.Е., специалист в области аэромеханики и теплотехники, газовой динамики лопаточных машин, разработал основы теории реактивных двигателей.

Орлин Андрей Сергеевич, профессор МВТУ им. Баумана, (1902 – 1988) – ученый в области теории прочности деталей ДВС. Разработал методику протекания рабочего процесса в двухтактных двигателях (см. приложение).

Широкую известность получили комбинированные двигатели конструкции В.Я. Климова, В.А. Константинова, А.А. Микулина, А. Д. Чаромского, А. Д. Швецова, В.М. Яковлева.

Для дальнейшего повышения эффективности двигателей внутреннего сгорания в современной практике широко применяют комбинированные двигатели, в которых поршневой двигатель и газовая турбина работают на одном и том же рабочем теле, так как в газовой турбине продолжается расширение газов, вытекающих из поршневого двигателя, и энергия от них передается потребителю.

В сложившейся кризисной ситуации с моторными топливами усиленно осваивают транспортные варианты двигателей Стирлинга, работающих на любых топливах, так как камера сгорания их размещена вне цилиндров. В качестве топлива в ДВС используется водород. Созданы топливные элементы, в которых водород не сгорает, а при помощи химических реакций окисляется кислородом воздуха и на аноде и катоде образуется напряжение, которое подается к электродвигателю вращающего, например, колеса автомобиля.

В России известны следующие заводы по выпуску двигателей внутреннего сгорания:

1. Барнаул («Алтайский завод прецизионных изделий» и «Барнаул-трансмаш» выпускают топливную аппаратуру и двигатели для тракторов, комбайнов и военной техники);

2. Ярославль (Ярославский моторный завод «Автодизель» выпускает дизели мощностью 110 – 588 кВт для автомобилей, автобусов, тракторов, комбайнов);

3. Заволжск (Заволжский моторный завод);

4. Набережные Челны (Камский моторный завод выпускает для автомобилей двигатели мощностью 170 – 260 кВт);

5. Тольятти (Волжский автомобильный завод, двигатели семейства ВАЗ);

6. Уфа (Уфимский моторный завод);

7. Челябинск (Челябинский тракторный завод выпускает двигатели для тракторов, тепловозов, автомобилей, судов);

8. Санкт-Петербург (завод «Звезда» выпускает двигатели для подводных лодок и судов);

9. Владимир (Владимирский тракторный завод выпускает двигатели с воздушным охлаждением для тракторов мощностью до 60 кВт);

10. Коломна (Коломенский завод выпускает дизели для тепловозов, судов и большегрузных автомобилей).

Современные двигатели становятся более интеллектуальными (умными). Рабочим процессом управляет мозговой центр – многофункциональные контроллеры. В системах управления применяется электроника, реализуется функция самодиагностики. Управление двигателем наделяется искусственным интеллектом, способным правильно (осмысленно) принимать решение в различных ситуациях. Управление двигателем можно осуществить с монитора компьютера. Качество двигателя оценивается его надежностью, долговечностью, минимальным удельным расходом топлива 160 – 170 г/(кВт·ч) и минимальной токсичностью отработавших газов (ЕВРО-5).

1.3. Классификация двигателей

Тепловые двигатели можно классифицировать по различным признакам:

1. По назначению двигатели делят на:

а) стационарные, применяемые на электростанциях, для привода насосных установок, на нефтяных и газоперекачивающих установках, в сельском хозяйстве;

б) транспортные, устанавливаемые на автомобилях, тракторах, самолётах, судах, локомотивных и других машинах и передвижных установках.

2. По роду используемого топлива различают двигатели внутреннего сгорания, работающие на:

а) лёгком жидком топливе (бензине и керосине);

б) тяжёлом жидком топливе (мазуте, соляровом масле, дизельном топливе и газойле);

в) газовом топливе (генераторном, природном, промышленном);

г) смешанном топливе (основным топливом является газ, а для пуска двигателя используется жидкое топливо);

д) различных топливах (бензине, керосине, дизельном топливе) – многотопливные двигатели.

3. По способу преобразования тепловой энергии в механическую двигатели классифицируют на двигатели:

а) внутреннего сгорания – поршневые и роторно-поршневые, в которых процессы химического реагирования и превращения тепловой энер-

гии в механическую работу происходят во внутрицилиндровом объёме (в пространстве над поршнем);

б) с внешним подводом теплоты, к которым относятся:

газотурбинные двигатели, в которых процессы химического реагирования происходят в отдельном агрегате (камере сгорания), образующее при этом рабочее тело (продукты сгорания) поступает на лопатки колеса турбины, где совершает работу;

в) двигатели, где теплота к постоянно циркулирующему по замкнутому контуру рабочему телу подводится в теплообменнике, а тепловая энергия затем используется в расширительном цилиндре (паровые двигатели, работающие по циклу Рэнкина, и двигатели, работающие по циклу Стирлинга);

г) комбинированные, в которых сгорание топлива осуществляется в поршневом двигателе, являющемся генератором газа, механическая работа совершается в цилиндре поршневого двигателя и частично – на лопатках колеса газовой турбины (свободнопоршневые генераторы газов, турбопоршневые двигатели).

4. По способу смесеобразования поршневые двигатели внутреннего сгорания делят на двигатели:

а) с внешним смесеобразованием – горючая смесь образуется вне цилиндра (карбюраторные [бензиновые] и газовые двигатели, а также двигатели с впрыском топлива во впускной коллектор);

б) с внутренним смесеобразованием – при впуске в цилиндр поступает только воздух, а рабочая смесь образуется внутри цилиндра. По такому способу работают дизели, в которых топливо в камеру сгорания подаётся, когда поршень находится вблизи верхней мёртвой точки (ВМТ) в конце процесса сжатия; двигатели с искровым зажиганием и впрыском топлива в цилиндр и газовые двигатели с подачей жидкого топлива или газа в цилиндр в начале процесса сжатия;

в) с расслоением заряда, при котором в различных зонах камеры сгорания образуется рабочая смесь разного состава.

5. По способу воспламенения рабочей смеси различают двигатели:

а) с воспламенением рабочей смеси от электрической искры (с искровым зажиганием);

б) с воспламенением от высокой температуры, которая возникает в процессе такта сжатия (дизели);

в) с форкамерно-факельным зажиганием, в которой смесь воспламеняется искрой в специальной камере сгорания небольшого объёма, а дальнейший процесс сгорания происходит в основной камере;

г) с воспламенением газового топлива от небольшой порции дизельного топлива, воспламеняющегося от сжатия, – газожидкостный процесс.

6. По способу осуществления рабочего цикла поршневые двигатели разделяют на:

а) четырёхтактные без наддува (впуск воздуха из атмосферы) и с наддувом (впуск свежего заряда под давлением);

б) двухтактные без наддува и с наддувом.

Применяют наддув с приводом компрессора от газовой турбины, работавшей на отработавших газах (газотурбинный наддув); от компрессора, механически связанного с двигателем, и от компрессоров, один из которых приводится в действие газовой турбиной, а другой – двигателем.

7. По способу регулирования в связи с изменением нагрузки различают двигатели:

а) с качественным регулированием, в которых при постоянном количестве вводимого в цилиндр воздуха увеличивается или уменьшается количество подаваемого топлива и состав смеси изменяется;

б) с количественным регулированием, в которых состав смеси остаётся постоянным и меняется её количество;

в) со смешанным регулированием – изменяются количество и состав смеси.

8. По конструкции двигатели различают:

а) поршневые двигатели, которые делятся:

по расположению цилиндров на вертикальные рядные, горизонтальные рядные, V-образные, звездообразные и с противолежащими цилиндрами;

по расположению поршней на однопоршневые (в каждом цилиндре имеются один поршень и одна рабочая полость), с противоположно движущимися поршнями (рабочая полость расположена между двумя поршнями, движущимися в одном цилиндре в противоположные стороны), двойного действия (по обе стороны поршня имеются рабочие полости);

б) роторно-поршневые двигатели:

ротор (поршень) совершает планетарное движение в корпусе; при движении ротора между ним и стенками корпуса образуются камеры переменного объёма, в которых совершается цикл.

9. По способу охлаждения различают двигатели:

а) с жидкостным охлаждением;

б) с воздушным охлаждением.

На автомобилях применяют поршневые двигатели с воспламенением от искры (карбюраторные, газовые, с впрыском топлива) и с воспламенением от сжатия (дизели), а также роторно-поршневые двигатели. Для ав-

томобилей малой грузоподъемности иногда используются электрические двигатели, работающие от аккумуляторных батарей.

На некоторых опытных автомобилях устанавливают двигатели газотурбинные, паровые, а также с внешним подводом теплоты, работающие по циклу Стирлинга.

1.4. История кафедры «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование»

Сибирский автомобильно-дорожный институт создан 1 декабря 1930 г. В это время формировались кафедры, в том числе была создана кафедра «Автомобили и тракторы», где важное место занимали курсы «Двигатели внутреннего сгорания» и «Теплотехника». Заведующим кафедрой был назначен Г. И. Эйдельсон. В 1955 г. кафедра разделилась на «Автомобили и двигатели» и кафедру «Ремонт и эксплуатация автомобилей». Кафедрой «Автомобили и двигатели» руководил Г. И. Эйдельсон.

В 1962 г. кафедра «Автомобили и двигатели» была разделена на кафедру «Автомобили», которой руководил М.А. Петров и кафедру «Двигатели» во главе с канд. техн. наук Александром Константиновичем Гавриловым.

Гаврилов А.К. – выпускник СибАДИ 1951 г. , участник Великой Отечественной войны. Он руководил кафедрой до 1979 г.

За это время укрепилась материальная база для проведения научно-исследовательских работ. Кафедра имела 6 моторных боксов, класс двигателей внутреннего сгорания, научную лабораторию системы охлаждения двигателей, лабораторию токсичности двигателей внутреннего сгорания. На стендах было установлено 32 двигателя различных модификаций, в том числе моторные установки для определения октановых и цетановых чисел моторных топлив. Октановое число определяет детонационную (взрывную) стойкость бензина, а цетановое число – способность дизельного топлива самовоспламеняться.

Научная работа кафедры проводилась по следующим направлениям.

Повышение эффективности охлаждения автотракторных двигателей - научный руководитель А.К. Гаврилов. Использование сжиженного газа в дизельных двигателя – ответственный исполнитель П.Л. Шевченко.

Исследования проводились и первыми аспирантами кафедры, среди них П.Л. Шевченко, Ю.И. Сердюк, П.И. Домань, Ю.А. Зензин, Ю.В. Костромин, А. Плотников, И.Н. Минаков, В.Р. Ведрученко.

Ведрученко В.Р. защитил кандидатскую и докторскую диссертации и работает в качестве профессора в Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС).

В 1979 г. заведующим кафедрой был избран Домань Петр Ильич, который руководил кафедрой до 1987 г. Домань П.И. – выпускник СибАДИ 1959 г. После окончания вуза он работал на производстве, а в 1961 г. вернулся на работу в СибАДИ. В 1963 году он поступает в аспирантуру, которую успешно закончил и защитил кандидатскую диссертацию.

С сентября 1999 – 2000 гг. кафедрой заведовал Корнеев Сергей Васильевич. Он закончил СибАДИ в 1973 г. по специальности «Дорожные машины».

В 2001 году заведующим кафедрой избирается по конкурсу д-р техн. наук Ненишев Анатолий Степанович.

С приходом Ненишева А.С. приобретено новое современное оборудование для лабораторий: «Эксплуатационные материалы», «Теплотехника», «Двигатели внутреннего сгорания», оживилась работа аспирантуры. За период 2001 – 2004 гг. кандидатские диссертации защитили А.С. Филатов, М.И. Ткаченко, А.Л. Иванов, докторскую диссертацию защитил С.В. Корнеев.

В феврале 2001 года кафедра «Двигатели» была переименована на название «Теплотехника и тепловые двигатели», а в 2003 г. СибАДИ получает лицензию на ведение образовательной деятельности по подготовке дипломированных инженеров по специальности 140501 – «Двигатели внутреннего сгорания», направлению 140501 – «Энергомашиностроение». В этом же году по этой специальности был сделан первый набор студентов в количестве 20 человек на специализацию 140507 – «Эксплуатация и сервисное обслуживание двигателей внутреннего сгорания». В 2008 г. 16 студентов защитили дипломные проекты и стали первыми выпускниками по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». Специальность 140501 – «Двигатели внутреннего сгорания» согласно Государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированных специалистов направления 140501 – «Энергомашиностроение» имеет различные специализации, из которых важными для кафедры являются:

- автомобильные и тракторные двигатели;
- эксплуатация и сервисное обслуживание двигателей.

Важный вклад при подготовке инженеров по специальности ДВС внесли ветераны кафедры – **Холмянский Игорь Антонович** – д-р техн. наук, проф., **Шевченко Петр Лукич** – канд. техн. наук, проф., **Домань Петр Ильич** – канд. техн. наук, доцент.

С 2010 г. кафедра «Двигатели внутреннего сгорания» готовит бакалавров направления подготовки 13.03.03 – «Энергетическое машиностроение» профиля «Двигатели внутреннего сгорания».

В 2015 г. кафедру «Двигатели внутреннего сгорания» объединили с кафедрой «Электрооборудование автомобилей» и дали название объединенной кафедре «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование» (ТД и АТЭ)). Руководит кафедрой канд. техн. наук, доцент Александр Леонидович Иванов.

За последние 5 лет под его руководством модернизированы лаборатории кафедры, приобретено и установлено современное оборудование, оживилась научная работа студентов. Ежегодно проходят научные конференции студентов и ППС кафедры. Печатаются научные статьи преподавателей и студентов в научных журналах «Вестник СибАДИ», «Омский научный вестник». С 2018 г. начата подготовка магистров.

На 0.1. 0.4. 2018 г. штат ППС кафедры составляет 8 человек, в том числе:

– Иванов Александр Леонидович – заведующий кафедрой, канд. техн. наук, доцент;

– Макушев Юрий Петрович – канд. техн. наук, доцент;

– Червенчук Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук, доцент;

– Руппель Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент;

– Войтенков Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент;

– Каня Валерий Анатольевич – ст. преподаватель;

– Максимов Владимир Викторович – ст. преподаватель;

– Подгурский Виталий Иванович – ст. преподаватель.

Штат УВП – четыре человека:

– Королев Виктор Николаевич – зав. лабораториями;

– Дмитриева Юлия Геннадиевна – инженер;

– Милевская Людмила Николаевна – инженер;

– Кузнецов Михаил Георгиевич – учебный мастер.

Более 30 лет проработала на кафедре в качестве старшего лаборанта Усс Галина Евгеньевна и учебным мастером Мясникова Светлана Николаевна. Большой вклад в корректировку рабочих программ и учебно-методических комплексов по всем дисциплинам кафедры внесла инженер по учебно-методической работе Смольникова Анна Александровна.

Много новых учебных стендов по устройству ДВС создали заведующий лабораториями Черняк Василий Иванович и учебный мастер Пуятин Валерий Константинович.

1.5. Научные направления кафедры

Все двигатели преобразуют какую-нибудь энергию в работу. Двигатели бывают разные – электрические, гидравлические, тепловые, в зависимости от того, какой вид энергии они преобразуют в работу. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – это тепловой двигатель, в котором в работу преобразуется теплота сгорающего в рабочей камере топлива. И газотурбинный двигатель самолета, и реактивный двигатель ракеты, и поршневой двигатель автомобиля – это все ДВС. Но обычно под ДВС понимают именно поршневой двигатель.

В поршневом двигателе сила давления газов, возникающая при сгорании топлива в рабочей камере, воздействует на поршень, который совершает возвратно-поступательное движение в цилиндре двигателя. Но это очень упрощенный взгляд на ДВС. На самом деле в ДВС сосредоточены сложнейшие физические явления, пониманию которых посвятили себя многие выдающиеся ученые (см. приложение).

Чтобы ДВС работал, в его цилиндре, сменяя друг друга, происходят такие процессы, как подача воздуха, впрыск и распыление топлива, его смешение с воздухом, воспламенение образовавшейся смеси, распространение пламени, удаление отработавших газов. На каждый процесс отводится несколько тысячных долей секунды. Добавьте к этому процессы, которые протекают в системах ДВС: теплообмен, течение газов и жидкостей, трение и износ, химические процессы нейтрализации отработавших газов, механические и тепловые нагрузки. Это далеко не полный перечень. И каждый из процессов должен быть организован наилучшим образом. Ведь из качества протекающих в ДВС процессов складывается качество двигателя в целом – его мощность, экономичность, шумность, токсичность, надежность, стоимость, вес и размеры.

Ни одна область деятельности человека несравнима с областью исследований ДВС по масштабам, количеству людей, занятых в разработке, производстве и эксплуатации. В развитых странах деятельность четверти населения прямо или косвенно связана с поршневым двигателестроением. Двигателестроение как исключительно наукоемкая область определяет и стимулирует развитие науки и образования. Общая мощность поршневых двигателей внутреннего сгорания составляет 70 – 80% мощности всех энергоустановок мировой энергетики.

На автомобильном, железнодорожном, водном транспорте, в сельском хозяйстве, строительстве, средствах малой механизации и ряде других областей поршневой ДВС как источник энергии не имеет альтернативы. Мировое производство только автомобильных двигателей непрерывно

увеличивается, превысив 60 млн единиц в год. Количество производимых в мире малоразмерных двигателей также превышает десятки миллионов в год. Даже в авиации поршневые двигатели доминируют по суммарной мощности, количеству моделей и модификаций, а также количеству установленных на самолеты двигателей. В мире эксплуатируется несколько сотен тысяч самолетов с поршневыми двигателями (спортивных, беспилотных). В США на долю поршневых двигателей приходится около 70% мощности всех двигателей, установленных на гражданских летательных аппаратах.

Еще не одно поколение ученых и конструкторов будут заниматься исследованием и совершенствованием ДВС. Еще очень долго ДВС будет давать работу тем, кто его производит, эксплуатирует, обслуживает и продает. Почему? Потому, что людям всегда будут нужны машины, совершающие за них механическую работу. ДВС отлично исполняет эту функцию. Долго ли? Наука и техника развиваются стремительно. Но в результате их развития альтернатив ДВС не возникло, а только возросла степень его совершенства. ДВС «хоронили» неоднократно. В разное время на смену ему прочили электродвигатели на аккумуляторах, топливные элементы на водороде и многое другое. ДВС неизменно побеждал в конкурентной борьбе. И даже проблема исчерпания запасов нефти и газа – это не проблема ДВС. Существует неограниченный источник топлива для ДВС. Это миллиарды тонн растительной массы Земли, а также отходы деятельности человека. Из них можно производить спирты и газы, при переходе на которые ДВС только выиграет, станет более экономичным, надежным, дешевым и практически безвредным для природы.

Наряду с образовательным процессом коллектив кафедры «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование» ведет и научную деятельность по следующим направлениям:

- повышение энергетической эффективности и эксплуатационных показателей тепловых двигателей и энергетических установок. Энергосберегающие технологии. Руководитель направления – А.Л. Иванов, канд. техн. наук, доцент;

- совершенствование рабочих процессов поршневых двигателей внутреннего сгорания. Руководитель направления – старший преподаватель В.И. Подгурский;

- разработка и совершенствование топливной аппаратуры современных дизелей, совершенствование агрегатов наддува с целью повышения мощности, снижения удельного расхода топлива и токсичности отработавших газов, использование ЭВМ в расчетах процесса сгорания топлива

в ДВС, наддува воздуха, совместной работы двигателя и турбокомпрессора. Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Ю.П. Макушев.

По материалам проведенных научных исследований коллективом кафедры ежегодно публикуются 10 – 15 научных статей и докладов на научно-технических конференциях, часть из них – в центральной печати. Одновременно с этим кафедра представляет оригинальные проекты и экспонаты на выставки достижений науки и техники различных уровней. Так, разработанный в 2002 г. проект «Передвижная мини-ТЭЦ» (авторы: д-р техн. наук А.С. Ненишев и канд. техн. наук Ю.П. Макушев) представлен на IV Всероссийскую выставку «Энергосбережение в регионах России».

К научной работе на кафедре привлекаются и студенты. Со своими докладами и разработками они выступают на ежегодных научно-технических конференциях СибАДИ, а также участвуют в различных конкурсах студенческих научных работ. В связи с открытием новой специальности 140501 – «Двигатели внутреннего сгорания» на кафедре активно ведется работа по разработке методических указаний к лабораторным и курсовым работам, дипломному проектированию, а также учебных пособий. При этом внимание уделяется разработкам для получения грифа УМО или Министерства образования России.

Сотрудниками кафедры были написаны следующие работы:

Макушев, Ю.П. Системы питания быстроходных дизелей: учебное пособие. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2004. – 179 с. Рекомендовано УМО по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебного пособия для студентов высших заведений, обучающихся по направлению 140500 – «Энергомашиностроение» специальности 140501 – «Двигатели внутреннего сгорания».

Шевченко, П.Л. Тепловые расчеты автомобильных двигателей: учебное пособие. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2007. – 187 с. (Гриф Министерства образования России).

Каня, В.А. Автомобильные эксплуатационные материалы (курс лекций). – Омск : Изд-во СибАДИ, 2006. – 192 с. (Гриф УМО).

За последние 10 лет ППС кафедры написали и выпустили три монографии, десять учебных пособий, двадцать методических пособий по проведению практических и лабораторных занятий. Некоторые учебные пособия и научные статьи выпущены в соавторстве со студентами (Филатов А.В., Скок А.А., Древель А.В.) [1, 2]. В настоящее время большинство учебных пособий, монографий выпускается в электронном варианте.

Ежегодно ППС кафедры публикуют до семи научных статей, которые посвящены расчету, конструированию, производству, испытанию, эксплу-

атации, диагностированию, экологии и ремонту двигателей внутреннего сгорания.

Ниже представлены некоторые труды ППС кафедры.

1. Макушев, Ю.П. Химмология : учебное пособие / Ю.П. Макушев, Л.Ю. Михайлова, А.В. Филатов. – Омск : СибАДИ, 2010. – 160 с.

2. Макушев, Ю.П. Расчет систем и механизмов двигателей внутреннего сгорания математическими методами : учебное пособие / Ю.П. Макушев, Т.А. Полякова, А.В. Филатов. – Омск : СибАДИ, 2011. – 284 с.

3. Макушев, Ю.П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю.П. Макушев, А.П. Жигadlo, Л.Ю. Волкова. – Омск: СибАДИ, 2017. – 208 с.

4. Холмянский, И.А. Конструирование двигателей внутреннего сгорания: конспект лекций / И.А. Холмянский. Омск : СибАДИ, 2010. – 153 с.

5. Шевченко, П.Л. Автомобильные двигатели / П.Л. Шевченко.– Омск : СибАДИ, 2014. – 153 с.

6. Каня, В.А. Информатика: практикум для студентов технических специальностей / В.А. Каня, Е.Н. Дмитриенко. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2007. – 150 с.

7. Содержание и правила оформления дипломного проекта: методические указания для студентов специальности 140501 – «ДВС» / сост.: А.Л. Иванов, В.А. Каня. – Омск : СибАДИ, 2011. – 44 с.

Для студентов, желающих заняться научной работой, можно выделить следующие направления:

– применение ЭВМ в расчетах систем ДВС (тепловой, динамический, прочностной расчеты, расчет систем снабжения воздухом, топливом);

– устройство, регулирование, исследование, совершенствование топливной аппаратуры бензиновых и дизельных двигателей;

– устройство и расчет систем управления топливной аппаратуры дизеля с форсунками, оборудованными электромеханическим и пьезоэлектрическим приводом;

– использование новых видов топлива (газа, водорода, рапсового масла) в ДВС;

– улучшение пусковых качеств дизеля при работе в зоне низких температур;

– улучшение процесса сгорания топлива, снижение токсичности отработавших газов;

– применение электрических, электронных и микропроцессорных систем при управлении двигателем;

– использование двигателей механического и электрического типа;

– снижение удельного расхода топлива в двигателях.

Содержание отчета

- 1. Название, цели и задачи работы.*
- 2. История развития двигателей внутреннего сгорания.*
- 3. Классификация двигателей.*
- 4. Научные направления кафедры.*
- 5. Выводы по работе.*

Контрольные вопросы и задания

- 1. Кем и когда был создан первый паровой двигатель?*
- 2. В каком году шотландский священник Роберт Стирлинг предложил конструкцию двигателя внешнего сгорания (топливо сгорает вне цилиндра)?*
- 3. В каком году француз Лемуар Жан Этьен создал первый двигатель внутреннего сгорания? Какой вид топлива он применил?*
- 4. Кто в Германии в 1862 г. построил первый четырехтактный двигатель мощностью 1,5 кВт со сжатием газовой смеси?*
- 5. В 1894 г. Рудольф Дизель продемонстрировал работу первого двигателя с воспламенением от сжатия мощностью 2 кВт. Укажите способ воспламенения горючей смеси (керосин и воздух)?*
- 6. Поясните, как классифицируются двигатели?*

Практическая работа № 2

УСТРОЙСТВО ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

2.1. Цели и задачи практической работы

Цели практической работы: формирование и закрепление знаний по разделу «Устройство и принцип действия поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС)».

Задачи: изучить устройство ДВС и материалы, применяемые при их производстве.

2.2. Устройство механизмов и систем двигателя

Двигатель внутреннего сгорания состоит из кривошипно-шатунного механизма (корпуса и движущихся деталей), механизма газораспределения и систем снабжения воздухом, питания, зажигания, смазки, охлаждения. Расположение цилиндров и их количество может быть различно (от одного до восемнадцати). На рис. 2.1 показано возможное расположение цилиндров. В авиационном применении используют звездообразные двигатели.

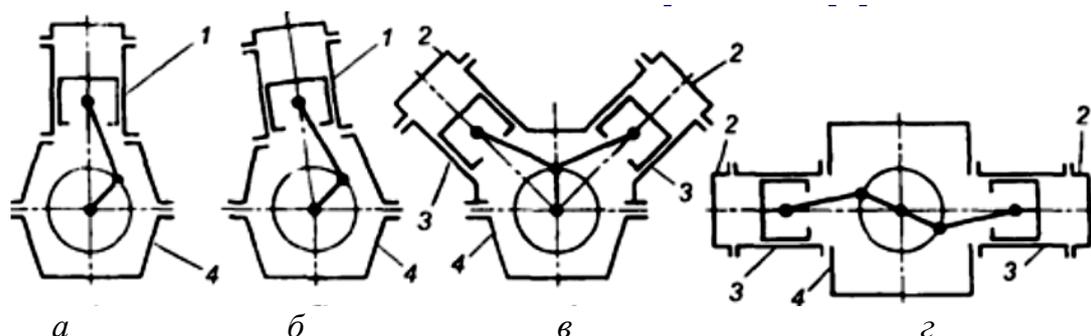


Рис. 2.1. Варианты расположения цилиндров двигателя:

a – однорядного; *б* – однорядного с наклоном от вертикали;

в – V-образного; *г* – оппозитного (угол 180°);

1 – цилиндр; 2 – головка цилиндров; 3 – блок-картер;

4 – поддон

На рис. 2.2 и 2.3 показан общий вид с разрезом двигателей внутреннего сгорания.

Корпус (остов) двигателя состоит из неподвижных деталей, поддерживающих движущиеся детали кривошипно-шатунного механизма. К ним относятся фундаментная рама или поддон, картер, цилиндры, крышка (головка) цилиндров.

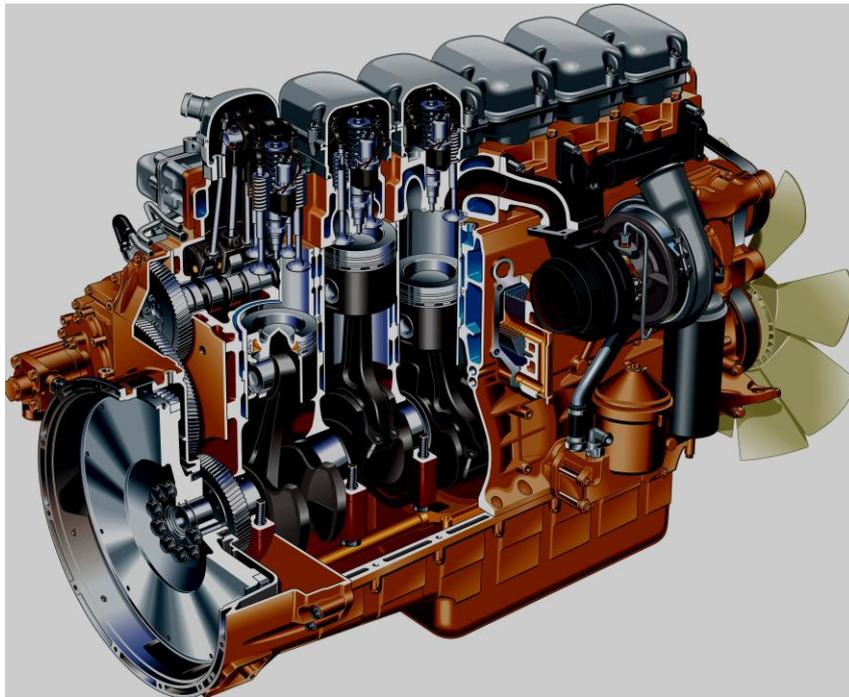


Рис. 2.2. Общий вид двигателя внутреннего сгорания

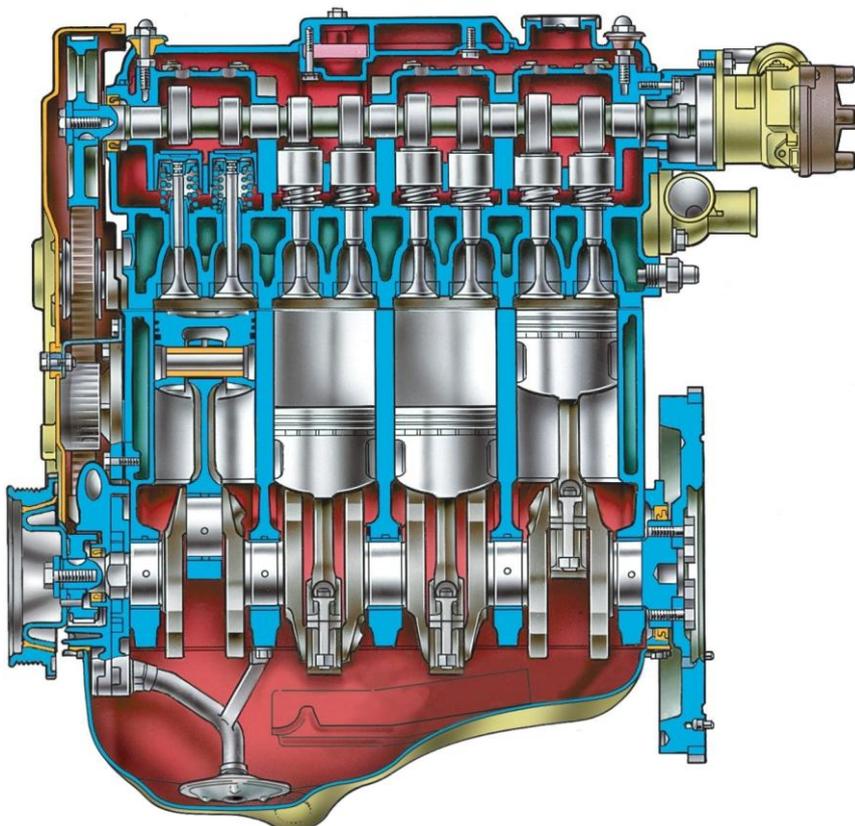


Рис. 2.3. Разрез двигателя внутреннего сгорания

Движущиеся детали кривошипно-шатунного механизма (рис. 2.4) воспринимают давление газов, передают возникающие силы коленчатому валу и преобразуют поступательное движение поршня во вращательное движение коленчатого вала. К этим деталям относятся поршневые комплекты, шатуны (в отдельных случаях кресткопфный механизм), коленчатый вал и маховик.



Рис. 2.4. Кривошипно-шатунный механизм (коленчатый вал, шатуны, поршни)

Механизм газораспределения (рис. 2.5) предназначен для осуществления в определенной последовательности выпуска продуктов сгорания и впуска в цилиндры свежего заряда. Он состоит из впускных и выпускных элементов (клапанов) и деталей, передающих движение от коленчатого вала – шестерен, распределительных валов, толкателей, штанг и коромысел.

Система подачи воздуха (рис. 2.6) предназначена для подачи воздуха в цилиндры двигателя под определенным давлением. Давление воздуха создается при помощи лопаточных или объёмных нагнетателей [3]. К данной системе относятся воздушный фильтр, продувочный насос (в двухтактных двигателях без наддува), компрессор или турбокомпрессор, детали привода, воздушный охладитель.

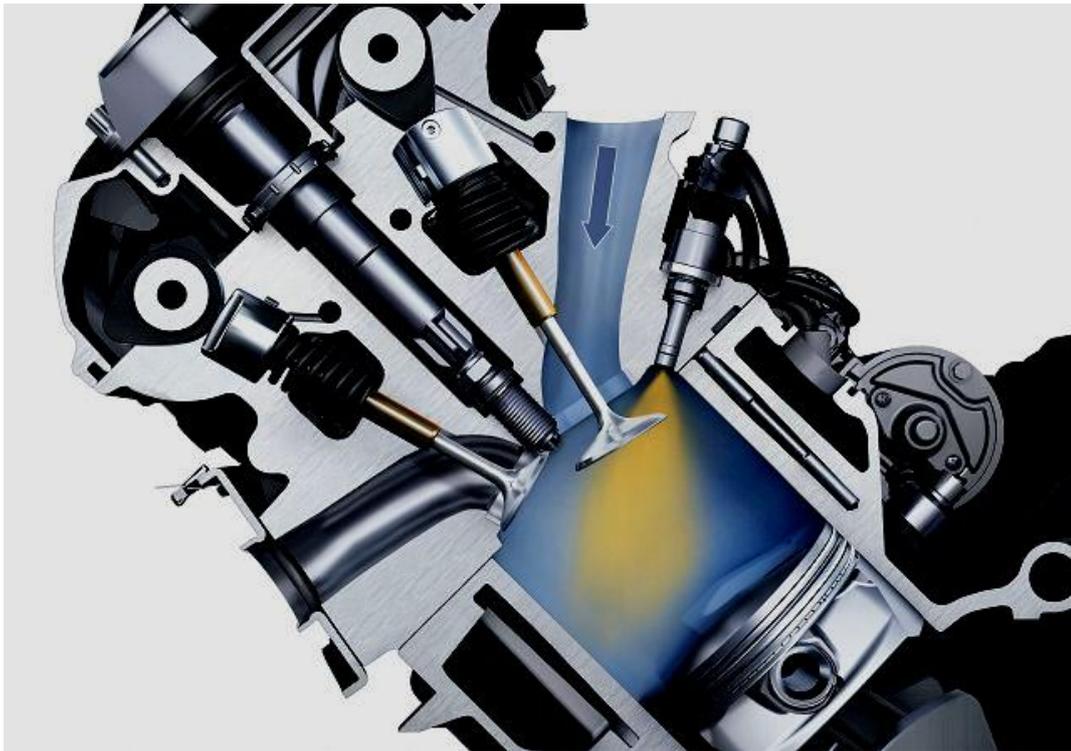


Рис. 2.5. Механизм газораспределения
(валы кулачковые, толкатели, пружины, клапаны)

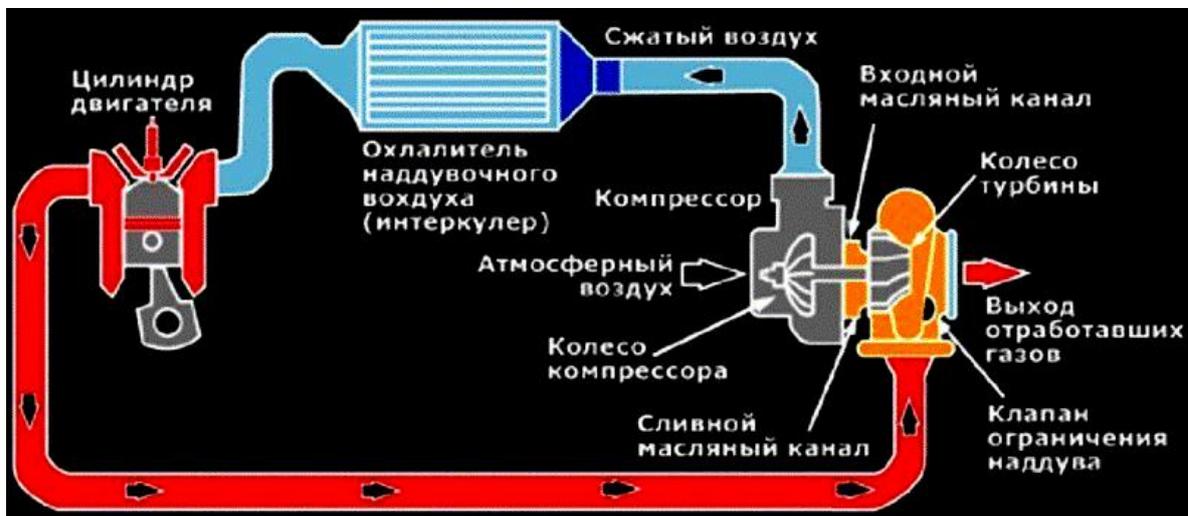


Рис. 2.6. Система подачи воздуха в цилиндр двигателя
при помощи газотурбинного наддува

Система питания обеспечивает подготовку и распыливание топлива, а также регулирование качества или количества заряда (топлива и воздуха). Система питания карбюраторных (бензиновых) и газовых двигателей состоит из карбюраторов или смесительных устройств, регуляторов,

баков или баллонов, топливоподающих насосов, форсунок для впрыска топлива. Система питания дизелей включает топливные баки, топливные насосы низкого и высокого давления, фильтры, регуляторы, форсунки для впрыска топлива [3].

Система смазки (рис. 2.7) служит для подвода масла к узлам трения, уменьшения их износа и охлаждения трущихся поверхностей. Она состоит из масляных насосов, фильтров, маслосборников, масляных холодильников, маслопроводов.

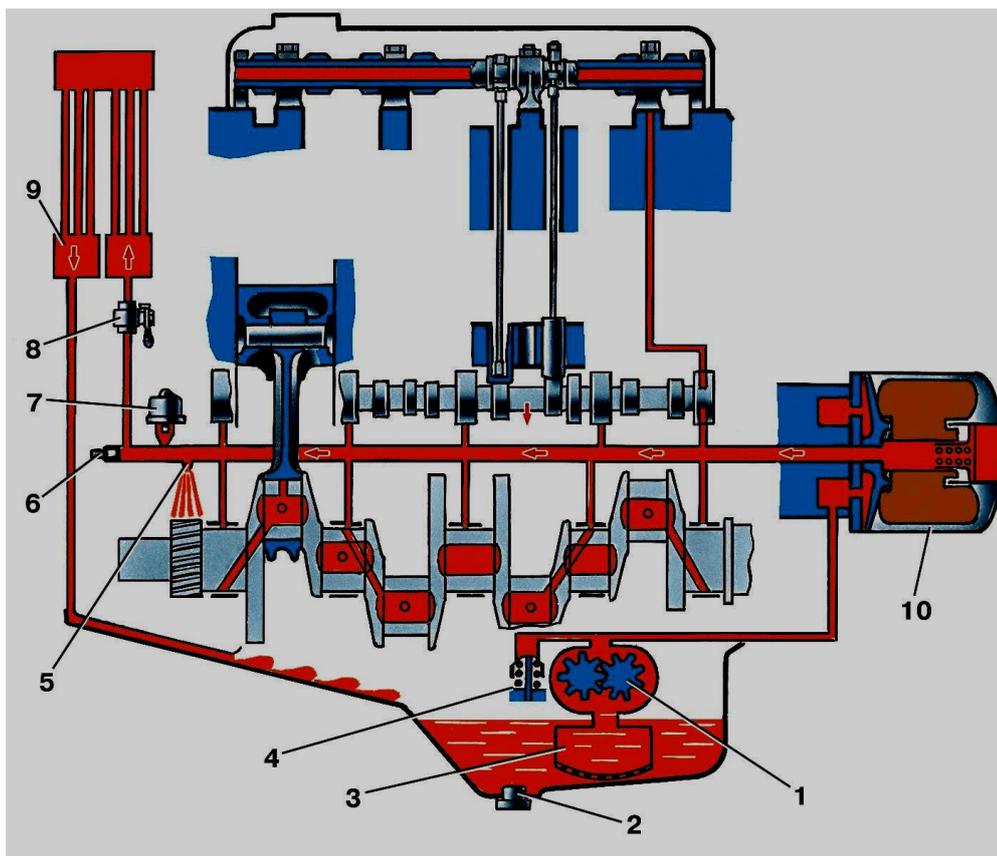


Рис. 2.7. Система смазки двигателя:

- 1 – насос шестеренный; 2 – пробка сливная; 3 – фильтр; 4 – клапан перепускной; 5 – главная масляная магистраль; 6 – клапан предохранительный; 7 – датчик давления; 8 – кран; 9 – радиатор; 10 – центрифуга

Система зажигания предназначена для принудительного воспламенения рабочей смеси от электрической искры, возникающей между электродами свечи под действием импульса электрического тока высокого напряжения. Система зажигания используется в карбюраторных (бензиновых) и газовых двигателях и состоит из аккумуляторной батареи, генератора, катушки зажигания, свечей зажигания, проводов и прерывателя-распределителя (коммутатора). В современных системах зажигания нет

прерывателя-распределителя. Система состоит из свечей зажигания, катушек и электронного блока с датчиками.

Система охлаждения (рис. 2.8) обеспечивает охлаждение деталей двигателя, соприкасающихся с горячими газами. Охлаждение двигателя осуществляется при использовании воды, специальных жидкостей, масла (поршни), топлива (распылители, насосы-форсунки) или воздуха. К этой системе в зависимости от способа охлаждения относятся различные механизмы и устройства, обеспечивающие циркуляцию теплоносителя, и теплообменники. Например, система охлаждения водой или тосолом автомобильного двигателя состоит из насоса (помпы), радиатора, вентилятора, каналов, полостей в блоке и головке цилиндров и термостата.

Термостат является главным узлом системы охлаждения (рис. 2.9). Когда температура охлаждающей жидкости (тосола) не превышает значения $85 - 90^{\circ}$, клапан термостата «закрыт» и жидкость движется по малому кругу, минуя радиатор. Это позволяет ускорить время прогрева двигателя. Если температура охлаждающей жидкости превысит 90° , то клапан переходит в режим «открыт» и жидкость начинает циркулировать по большому кругу, проходя через радиатор. Температура достигает оптимального значения (для закрытых систем $110 - 120^{\circ}$).

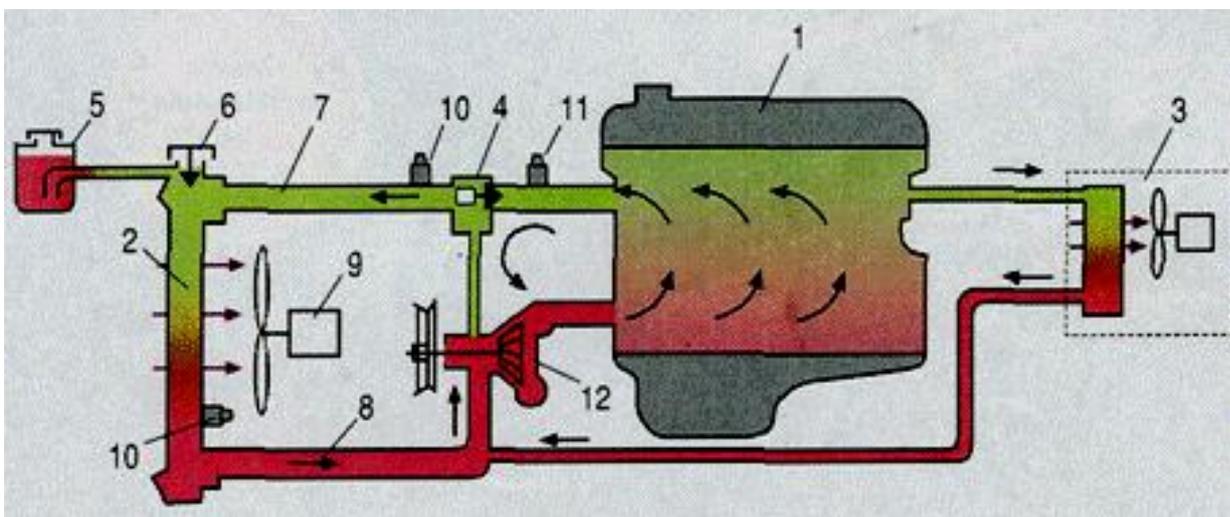


Рис. 2.8. Система охлаждения двигателя:

1 – двигатель; 2 – радиатор; 3 – отопитель; 4 – термостат; 5 – расширительный бачок; 6 – пробка радиатора; 7 – верхний патрубок; 8 – нижний патрубок; 9 – вентилятор радиатора; 10 – датчик включения вентилятора; 11 – датчик температуры; 12 – помпа

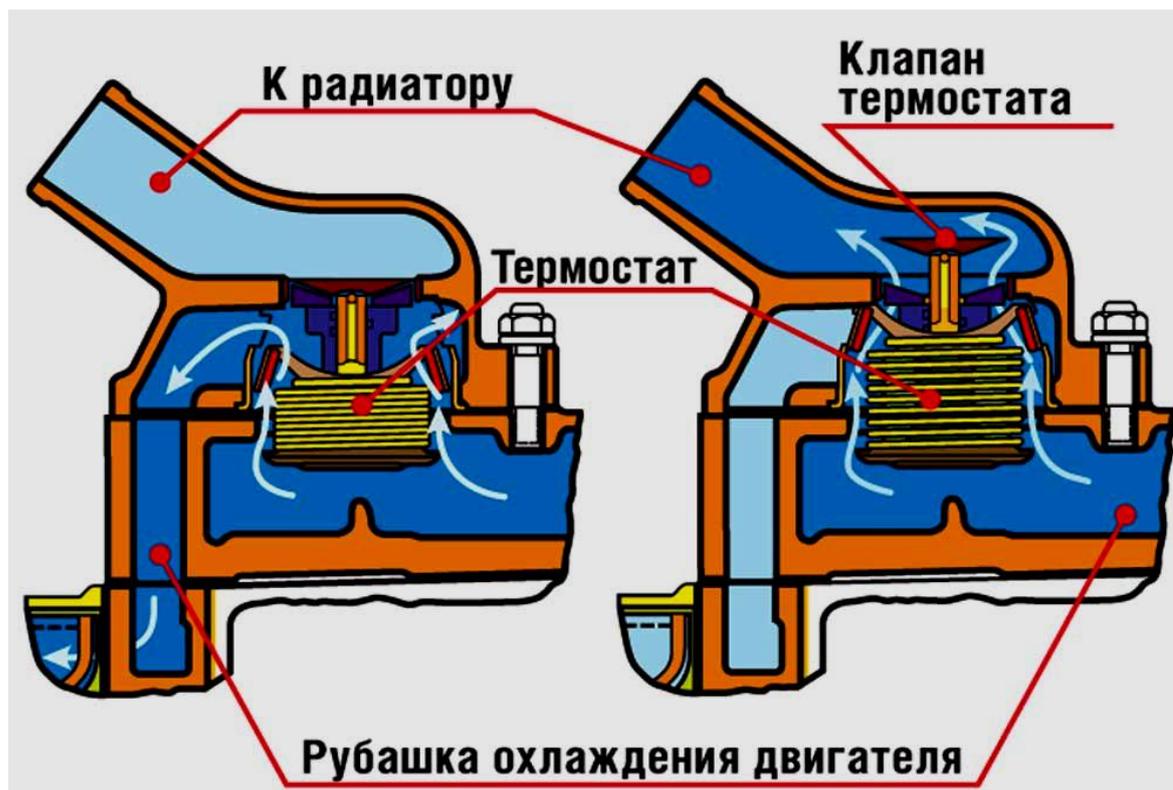


Рис. 2.9. Клапан-термостат в положении «закрыт» (слева) и «открыт»

Кроме представленных механизмов и систем в конструкции двигателя могут быть другие механизмы и узлы. Например, устройства для пуска, реверса, контроля, управления, утилизации теплоты отработавших газов, нейтрализации токсичных выбросов.

2.3. Материалы, применяемые при производстве деталей ДВС

При производстве деталей ДВС применяют сталь, чугун, алюминий, сплавы, резину и полимеры.

Сталь – это сплав железа с углеродом, в котором углерода находится до 2%. У конструкционных сталей первые две цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента (Сталь 45). В инструментальных сталях указывают количество углерода в десятых долях и процентное содержание легирующих добавок (Сталь 3Х13). В данной стали 0,3% углерода и 13% хрома.

Если коленчатый вал изготовлен из стали 45Х, то следует понимать, что в данной стали 0,45% углерода и до 1% хрома.

Чугун – сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится более 2% (3 – 4,5%). Если мы имеем серый чугун марки 45 (СЧ-45), то

цифра 45 обозначает предел прочности при растяжении в кгс/мм² (450 МПа). Из чугуна марки СЧ-45 изготавливают блоки цилиндров.

При изготовлении сплавов, применяют материалы, характеристика которых приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Характеристика материалов

Наименование материала	Обозначение	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С
Алюминий	Ю (А)	2700	660
Медь	Д (Cu)	8960	1080
Магний	Мг (Mg)	1740	650
Олово	О (Sn)	6000	232
Свинец	С (Pb)	11300	327
Сурьма	С (Sc)	670	630

Бронза – сплав на основе меди с добавлением свинца, олова, алюминия.

Латунь – сплав меди и цинка. Баббит – сплав на основе олова или свинца с добавлением меди и сурьмы (назван в честь американского изобретателя). Сурьма улучшает литейные качества сплава, а магний способствует «раскислению» металлов.

При изготовлении вкладышей для коренных и шатунных шеек применяют сплавы, которые обладают высокой износостойкостью и низкой температурой плавления (300 – 350 °С). Низкая температура плавления материалов, входящих в состав антифрикционных сплавов вкладышей, необходима для предупреждения аварийных ситуаций. Например, вышел из строя масляный насос, и началось сухое трение в паре вал-подшипник. Температура в паре резко повышается, что может привести к задирам коленчатого вала. Коленчатый вал сложная и дорогая деталь двигателя. От «задилов» его спасают вкладыши, фрикционный слой которых плавится, зазор между валом и вкладышами увеличивается. Резкий шум в двигателе (грохот) – признак неисправности, и водитель обязан остановить работу двигателя.

Вкладыш состоит из стальной основы (2–3 мм) и антифрикционного слоя. Для бензиновых двигателей применяют высокооловянистый **баббит Б-83**, состоящий из 83% олова, 6% меди и 11% сурьмы. Для дизелей применяется свинцовистая бронза **Бр.С-30**, состоящей из 30% свинца и 70% меди.

В двигателях применяются материалы, представленные в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Основные материалы деталей двигателя

Название деталей	Материал	Примечание
Коленчатый вал	Сталь 45, СПЧ	
Шатун	40Х, 45Г2	
Палец	15Х, 45Х	
Поршень	АК4, АЛ10В	
Кольца компрессионные	СПЧ ¹	Специальный чугун
Кольца маслоъемные	СПЧ ¹	Специальный чугун

Содержание отчета

1. Название, цели и задачи работы.
2. Устройство и принцип работы двигателя внутреннего сгорания.
3. Название механизмов и систем двигателя, их назначение.
4. Принцип работы клапана-термостата.
5. Материалы, применяемые в процессе производства деталей двигателя.
6. Таблицы 2.1 и 2.2.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Поясните, что называют системой и механизмом двигателя?
2. Для какой цели служит кривошипно-шатунный механизм?
3. Какую функцию выполняет газораспределительный механизм?
4. Для чего служит система охлаждения двигателя и как она работает?
5. Как устроен клапан-термостат и как он работает в системе охлаждения двигателя?
6. Поясните назначение системы смазки, питания, зажигания двигателя?
7. Основные материалы, применяемые в процессе производства деталей двигателя.
8. Из какого материала изготавливают подшипники скольжения (вкладыши)?
9. Поясните количество углерода в процентах для стали: Сталь 45.

Практическая работа № 3

ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ДВУХ, ЧЕТЫРЕХ И ВОСЬМИ ТАКТАХ

3.1. Цели и задачи практической работы

Цели практической работы: формирование и закрепление знаний по разделу «Организация рабочего цикла двигателей при различных тактах».

Задачи: изучить особенности работы двухтактного, четырехтактного и восьмитактного двигателей.

3.2. Работа двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой

Рабочий цикл двухтактного двигателя протекает за один оборот (360°) коленчатого вала. Рассмотрим организацию самого простого цикла двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой.

Рабочий цикл двухтактного карбюраторного (бензинового) двигателя показан на рис. 3.1. В двухтактном двигателе с кривошипно-камерной продувкой отсутствуют клапаны. Впуск горючей смеси и выпуск отработавших газов у двигателя осуществляется через окна в цилиндре, которые своевременно открываются и закрываются движущимся поршнем.

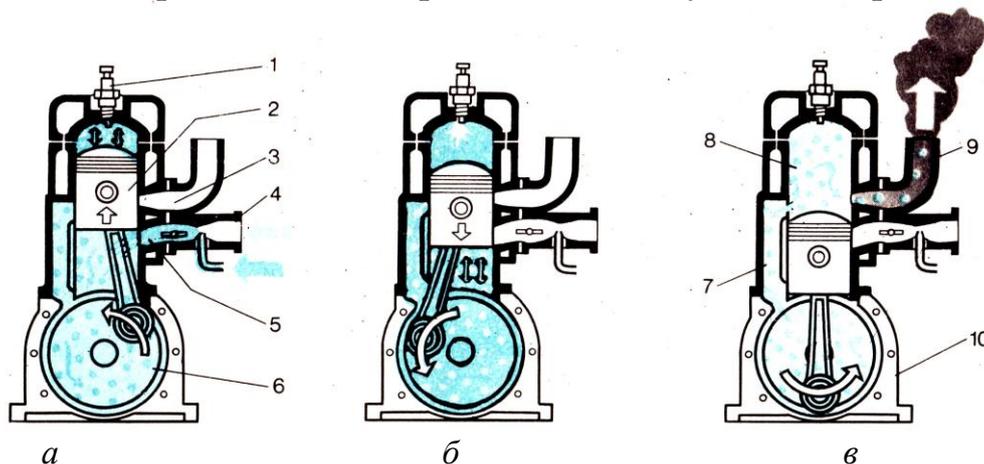


Рис. 3.1. Схема работы двухтактного двигателя: *а* – первый такт; *б* – конец первого и начало второго такта; *в* – конец второго такта;

1 – свеча зажигания;

2 – поршень;

3 – выпускное окно цилиндра;

4 – карбюратор;

5 – впускное окно цилиндра;

6 – кривошипная камера;

7 – продувочный канал;

8 – цилиндр;

9 – выхлопная труба;

10 – картер

При движении вверх поршень 2 (рис. 3.1, *а*) перекрывает выпускные окна 3 в цилиндре, в результате чего над поршнем происходит сжатие рабочей смеси. Одновременно под поршнем создается разрежение, и из карбюратора 4 через впускные окна 5 цилиндра горючая смесь засасывается в кривошипную камеру 6.

При подходе поршня к верхней мертвой точке в свече зажигания 1 (рис. 3.1, *б*) образуется электрическая искра и рабочая смесь в цилиндре воспламеняется. На этом заканчивается первый такт.

Под давлением образовавшихся от сгорания рабочей смеси газов поршень перемещается вниз, совершая рабочий ход, который происходит до тех пор, пока откроются выпускные окна, и начнется выпуск отработавших газов через выпускную трубу наружу. При движении поршня вниз горючая смесь в кривошипной камере сжимается. В конце второго такта поршень открывает окно продувочного канала 7 и горючая смесь нагнетается из кривошипной камеры в цилиндр, вытесняя из него отработавшие газы (рис. 3.1, *в*). Происходит продувка и одновременно наполнение цилиндра свежей горючей смесью. При этом горючая смесь частично выходит вместе с отработавшими газами. Таким образом, за два хода поршня (два такта) совершается полный рабочий цикл.

Двигатели с описанным рабочим процессом называют двигателями с кривошипно-камерной продувкой. Эти двигатели по конструкции и в эксплуатации проще, чем четырехтактные. Их работа протекает более равномерно потому, что рабочий ход происходит при каждом обороте коленчатого вала. Однако двухтактные двигатели менее экономичны, чем четырехтактные. При продувке через выпускные окна теряется 30% горючей смеси. Поэтому двухтактные карбюраторные двигатели используют при кратковременной работе для запуска дизельного двигателя трактора.

В двухтактном двигателе с кривошипно-камерной продувкой роль продувочного (насоса) агрегата выполняет кривошипная камера.

Преимущество двухтактных двигателей с кривошипно-камерной схемой газообмена – простота устройства. Однако при данном способе газообмена очистка цилиндра и наполнение его свежим зарядом по сравнению с другими способами происходят значительно хуже, в результате чего уменьшается мощность и ухудшается экономичность двигателя.

Для повышения экономичности двухтактных двигателей применяют различные схемы продувки (газообмена).

Клапанно-щелевая продувка обеспечивает хорошее качество газообмена (рис. 3.2, *а*).

Петлевая схема газообмена (рис. 3.2, *б*) значительно упрощает конструкцию двигателя, но при этом ухудшается качество газообмена, и воз-

никают потери воздуха или смеси при наполнении. Петлевая схема газообмена отличается большим разнообразием конструктивного выполнения и широко применяется в двигателях различного назначения (от маломощных для мопедов и до крупных мощностью в несколько десятков тысяч киловатт для судов).

Прямоточная схема газообмена с противоположно движущимися поршнями (рис. 3.2, в), в которой один поршень управляет впускными окнами, а другой – выпускными, обеспечивает высокое качество газообмена.

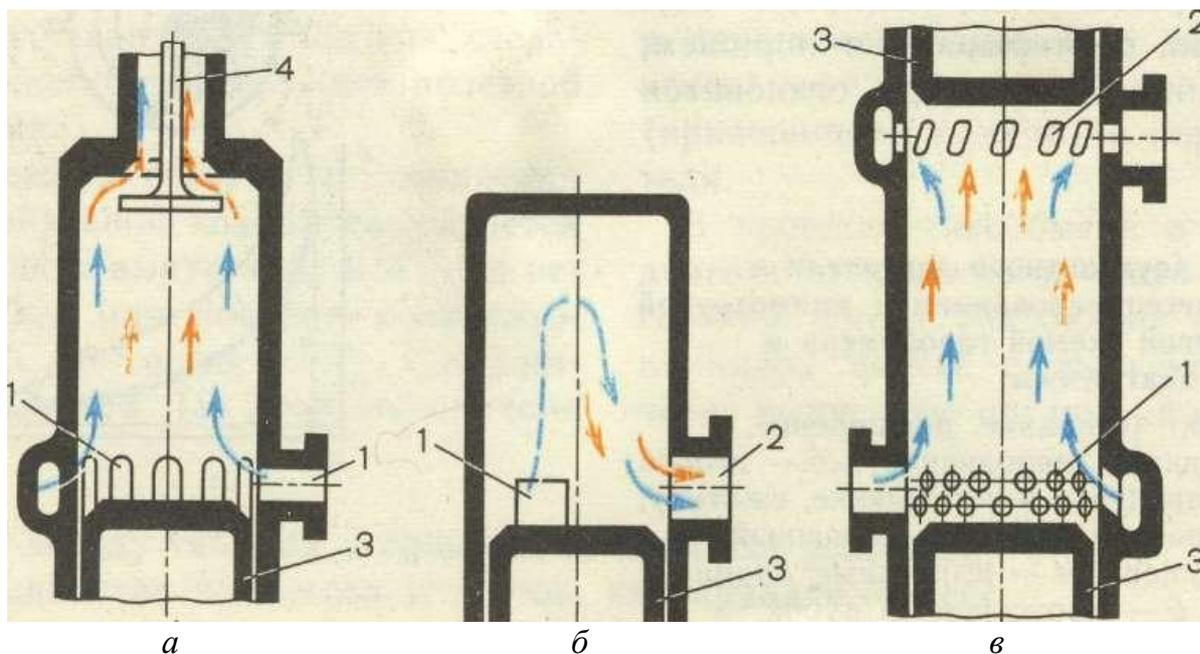


Рис. 3.2. Схемы газообмена двухтактных двигателей:
а – прямоточная клапанно-щелевая; *б* – петлевая;
в – прямоточная с противоположно движущимися поршнями; 1 – впускное окно; 2 – выпускное окно;
 3 – поршень; 4 – выпускной клапан

Рассмотрим работу двухтактного двигателя с клапанно-щелевой продувкой.

3.3. Работа двухтактного двигателя с клапанно-щелевой схемой газообмена

Из рассмотрения четырёхтактного цикла следует, что четырёхтактный двигатель только половину времени, затраченного на цикл, работает как тепловой двигатель (такты сжатия и расширения). Вторую половину времени (такты впуска и выпуска) двигатель работает как насос.

Более полно время, отводимое на рабочий цикл, используется в двухтактных двигателях, в которых рабочий цикл совершается за два такта (за

один оборот коленчатого вала). В отличие от четырехтактных двигателей в двухтактных очистка рабочего цилиндра от продуктов сгорания и наполнение его свежим зарядом, т. е процессы газообмена, происходят только при движении поршня вблизи НМТ.

В процессе газообмена в двухтактных двигателях некоторая часть воздуха (дизель) или горючей смеси (бензиновый двигатель) удаляется из цилиндра вместе с выпускными газами через выпускные органы.

На рис. 3.3 показана схема работы двухтактного двигателя с внутренним смесеобразованием и прямоточной клапанно-щелевой схемой газообмена. Особенности устройства двигателя этого типа являются:

- впускные окна 8 расположены в нижней части цилиндра, высота которых составляет 10 – 20% от хода поршня;

- открытие и закрытие впускных окон производится поршнем при его движении в цилиндре;

- выпускные клапаны 4 размещены в крышке цилиндра и приводятся в движение от распределительного вала, частота вращения которого обеспечивает открытие клапанов один раз за один оборот коленчатого вала;

- продувочный нагнетатель роторного типа 2 подает под давлением воздух в ресивер 7 с целью очистки цилиндра от продуктов сгорания и наполнения его свежим зарядом.

Рабочий цикл двигателя осуществляется следующим образом.

Первый такт соответствует ходу поршня от ВМТ к НМТ (рис. 3.3, а). В цилиндре, например, только что произошло сгорание (линия *cz*), и начался процесс расширения газов, т.е осуществляется рабочий ход. Несколько раньше момента подхода поршня к впускным окнам открываются выпускные клапаны 4 в крышке цилиндра, и продукты сгорания начинают вытекать из цилиндра в выпускной патрубок. При этом давление в цилиндре резко падает (линия *zn*). Впускные окна 8 открываются верхней частью поршня, когда давление в цилиндре становится примерно равным давлению предварительно сжатого воздуха в ресивере или немного выше его. Воздух, поступая в цилиндр через впускные окна, вытесняет через впускные клапаны оставшиеся в цилиндре продукты сгорания и заполняет цилиндр (продувка), т.е осуществляется газообмен (участок *na* на индикаторной диаграмме).

Таким образом, в течение первого такта в цилиндре происходит **сгорание топлива, расширение газов, выпуск газов, продувка и наполнение цилиндра.**

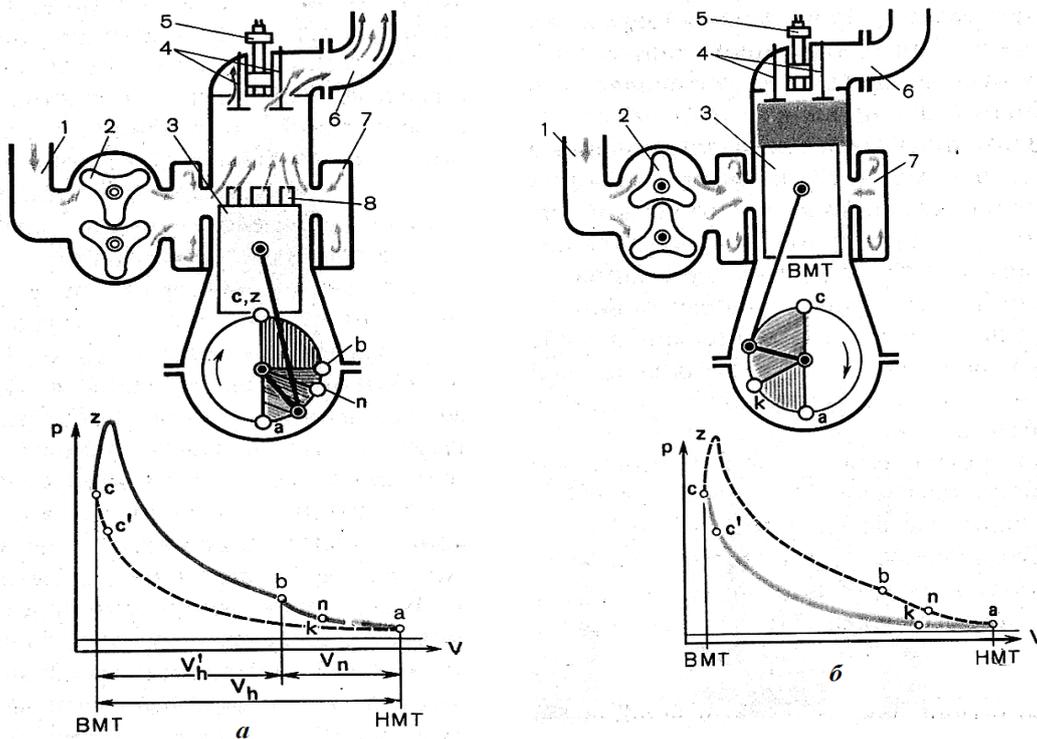


Рис. 3.3. Схема работы двухтактного двигателя с внутренним смесеобразованием и прямоточной клапанно-щелевой схемой газообмена и индикаторные диаграммы: *a* – первый такт (сгорание, расширение, выпуск, продувка и наполнение); *б* – второй такт (выпуск, продувка и наполнение, сжатие); 1 – выпускной патрубок; 2 – продувочный нагнетатель; 3 – поршень; 4 – выпускные клапаны; 5 – форсунка; 6 – выпускной патрубок; 7 – воздушный ресивер; 8 – впускные окна

Второй такт соответствует ходу поршня от НМТ к ВМТ (рис. 3.3, *б*). В начале хода поршня продолжают процессы удаления выпускных газов, продувки и наполнения цилиндра свежим зарядом. Конец продувки цилиндра (линия *ak*) определяется моментом закрытия впускных окон и выпускных клапанов. Последние закрываются или одновременно с впускными окнами, или несколько ранее. Давление в цилиндре к концу газообмена в двухтактных двигателях несколько выше атмосферного и зависит от давления воздуха в ресивере. С момента окончания газообмена и полного перекрытия поршнем впускных окон начинается процесс сжатия воздуха. Когда поршень не доходит за $10 - 30^\circ$ по углу поворота коленчатого вала до ВМТ (точка c^1), в цилиндр через форсунку начинает подаваться топливо в распыленном виде. Следовательно, в течение второго такта в цилиндре происходит **окончание выпуска, продувка и наполнение цилиндра в начале хода поршня и сжатие при его дальнейшем ходе.**

Сравнение рабочих циклов четырех- и двухтактных двигателей показывает, что при одинаковых размерах цилиндра и частотах вращения мощность двухтактного двигателя значительно больше. Учитывая увеличение числа рабочих тактов в 2 раза, следовало бы ожидать и увеличение мощности в 2 раза. В действительности мощность двухтактного двигателя увеличивается приблизительно в 1,5–1,7 раза в результате потери части рабочего объема, ухудшения очистки и наполнения, а также затраты мощности на приведение в действие продувочного насоса.

К преимуществам двухтактных двигателей следует также отнести большую равномерность крутящего момента, так как полный рабочий цикл осуществляется при каждом обороте коленчатого вала (а не за два, как в четырехтактных). Существенным недостатком двухтактного процесса по сравнению с четырехтактным является малое время, отводимое на процесс газообмена. Очистка цилиндра от продуктов сгорания и наполнение его свежим зарядом более совершенно происходят в четырехтактных двигателях.

При внешнем смесеобразовании в результате продувки цилиндра горючей смесью она частично выбрасывается через выпускные окна, поэтому двухтактный процесс применяется чаще в дизелях. Исключение составляют мотоциклетные, лодочные и другие двигатели небольшой мощности, для которых большее значение имеет простота и компактность конструкции, чем экономичность.

3.4. Общее устройство и принцип работы четырехтактного двигателя внутреннего сгорания

Двигатель внутреннего сгорания представляет собой совокупность механизмов и систем, преобразующих тепловую энергию сгорающего топлива в механическую.

На современных автомобилях подавляющее распространение получили поршневые двигатели внутреннего сгорания следующих двух типов: бензиновые и дизели.

Бензиновые двигатели и дизели могут иметь несколько цилиндров. При числе цилиндров от двух до шести они обычно размещаются в один ряд, и такие двигатели называют рядными. Если число цилиндров более шести, то их размещают обычно в два ряда, расположенные под углом друг к другу от 60° до 90° , и такие двигатели называют V-образными.

Наибольшее применение в технике получили **четырёхтактные** бензиновые двигатели и дизели.

Четырехтактный бензиновый двигатель или дизель включает в себя два механизма и четыре системы:

1) кривошипно-шатунный механизм – преобразует возвратно-поступательное движение поршней, воспринимающих давление газов, во вращательное движение коленчатого вала;

2) газораспределительный механизм – обеспечивает своевременный впуск горючей смеси или воздуха в цилиндры и выпуск из цилиндров отработавших газов;

3) система смазки – подводит смазку к трущимся поверхностям деталей, удаляет продукты износа;

4) система охлаждения – поддерживает заданный тепловой режим двигателя путем принудительного отвода теплоты от его деталей к окружающему воздуху;

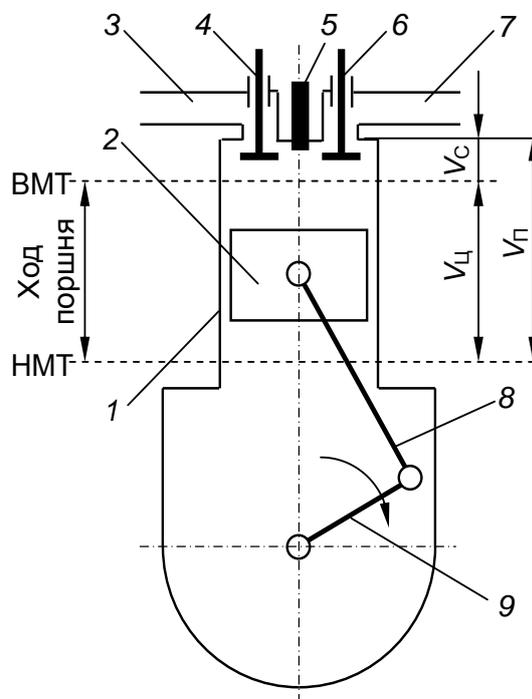
5) система питания – подает топливо и воздух в цилиндры двигателя, отводит отработавшие газы из цилиндров;

6) система зажигания – осуществляет принудительное воспламенение горючей смеси в точно заданный момент времени.

Общее устройство одного цилиндра четырехтактного двигателя показано на рис. 3.4 [4, 7].

Рис. 3.4. Схема четырехтактного двигателя:

- 1 – цилиндр; 2 – поршень;
- 3 – впускной трубопровод;
- 4 – впускной клапан;
- 5 – свеча зажигания бензинового двигателя или форсунка дизельного двигателя;
- 6 – выпускной клапан; 7 – выпускной трубопровод; 8 – шатун;
- 9 – коленчатый вал;
- $V_{Ц}$ – рабочий объем цилиндра;
- $V_{С}$ – объем камеры сгорания;
- $V_{П}$ – полный объем цилиндра



В цилиндре 1 размещен поршень 2, шарнирно соединенный шатуном 8 с коленчатым валом 9. При вращении коленчатого вала 9 поршень 2 совершает возвратно-поступательные движения между нижней и верхней мертвыми точками:

- верхняя мертвая точка (ВМТ) – крайнее верхнее положение поршня 2, наиболее удаленное от оси коленчатого вала 9;

- нижняя мертвая точка (НМТ) – крайнее нижнее положение поршня 2, наиболее приближенное к оси коленчатого вала 9.

В мертвых точках поршень меняет направление движения на противоположное. Коленчатый вал 9 приводит в действие газораспределительный механизм, который обеспечивает своевременное открытие и закрытие:

- впускного клапана 4, через который при ходе поршня 2 от ВМТ к НМТ из впускного трубопровода 3 в цилиндр 1 поступает горючая смесь у бензинового двигателя или воздух у дизеля;

- выпускного клапана 6, через который при ходе поршня 2 от НМТ к ВМТ из цилиндра 1 отработавшие газы отводятся в выпускной трубопровод 7.

Воспламенение горючей смеси осуществляется:

- **в бензиновом двигателе** – от электрической искры (температура в центре искры 10 000 К), создаваемой свечой зажигания 5, работу которой обеспечивает система зажигания;

- **в дизеле** – самовоспламенением после впрыска распыленного топлива через форсунку 5. Температура воздуха в конце такта сжатия достигает 670 – 770 К, а температура самовоспламенения дизельного топлива составляет 520 – 570 К.

Тактом называют часть рабочего цикла двигателя, происходящего при движении поршня от одной мертвой точки к другой. Рабочий процесс (цикл) четырехтактных двигателей совершается за четыре хода поршня (четыре такта) или за два оборота коленчатого вала и состоит из последовательно чередующихся тактов: 1) впуска; 2) сжатия; 3) рабочего хода; 4) выпуска.

Такт впуска (см. рис. 3.4). Поршень 2 движется от ВМТ к НМТ. Выпускной клапан 6 закрыт, впускной клапан 4 открыт. Движение поршня 2 создает разрежение в цилиндре 1. Под действием разрежения в цилиндр двигателя через открытый впускной клапан всасывается воздух у дизеля или горючая смесь у бензинового двигателя. Горючая смесь перемешивается с остаточными отработавшими газами, образуя рабочую смесь.

Такт сжатия. Поршень 2 движется от НМТ к ВМТ. Выпускной 6 и впускной 4 клапаны закрыты. Объем пространства над поршнем уменьша-

ется, а давление в цилиндре увеличивается, и вместе с ним повышается температура в цилиндре. В конце такта сжатия происходит воспламенение рабочей смеси:

– в бензиновом двигателе – вследствие электрической искры, создаваемой свечой зажигания 5;

– в дизеле – в результате впрыска через форсунку 5 распыленного топлива, которое перемешивается с воздухом и остаточными отработавшими газами, создавая рабочую смесь, и воспламеняется вследствие высокой температуры в цилиндре.

Такт рабочего хода. Выпускной 6 и впускной 4 клапаны закрыты. Рабочая смесь быстро сгорает (в течение 0,001 – 0,002 с) в цилиндре. Температура и давление образовавшихся в результате горения газов в цилиндре возрастают. Под действием давления газов поршень 2 движется от ВМТ к НМТ и совершает полезную работу, вращая через шатун 8 коленчатый вал 9. По мере перемещения поршня к НМТ и увеличения пространства над поршнем давление и температура в цилиндре снижаются.

Такт выпуска. Поршень 2 движется от НМТ к ВМТ. Впускной клапан 4 закрыт, выпускной клапан 6 открыт. Отработавшие газы вытесняются поршнем из цилиндра через открытый выпускной клапан. Давление и температура в цилиндре уменьшаются.

После окончания такта выпуска рабочий цикл повторяется и вновь начинается такт впуска. В рабочем цикле четырехтактного двигателя полезная работа совершается только в течение одного такта – рабочего хода. Остальные три такта (впуск, сжатие, выпуск) являются вспомогательными, и на их осуществление затрачивается часть энергии, вырабатываемой в такте рабочего хода.

3.5. Рабочий цикл четырехтактного двигателя

Рабочий цикл четырехтактный двигателей состоит из четырех тактов – впуска, сжатия, сгорания и расширения. Все эти такты рабочего процесса в четырехтактных двигателях осуществляются за четыре хода поршня (два оборота коленчатого вала).

При открытом всасывающем клапане (рис. 3.5, а) и движении поршня от ВМТ к НМТ (рис. 3.5, д, линия $r - a$) цилиндр двигателя наполняется свежей топливно-воздушной смесью (двигатели с внешним смесеобразованием) или воздухом. Этот первый ход поршня называется тактом впуска (наполнения). Всасывающий клапан закрывается с запаздыванием, после того как поршень пройдет НМТ и начнет движение к ВМТ. При движении поршня от НМТ к ВМТ (рис. 3.5, б), линия $a - m - c$) осуществляются ко-

нец наполнения и сжатие при закрытых клапанах топливно-воздушной смеси до температуры T_c , меньшей температуры воспламенения топлива T_{cm} (бензиновые и газовые двигатели), или воздуха до температуры T_c , большей температуры самовоспламенения топлива T_{cm} (дизели). Второй ход поршня называется *тактом сжатия*.

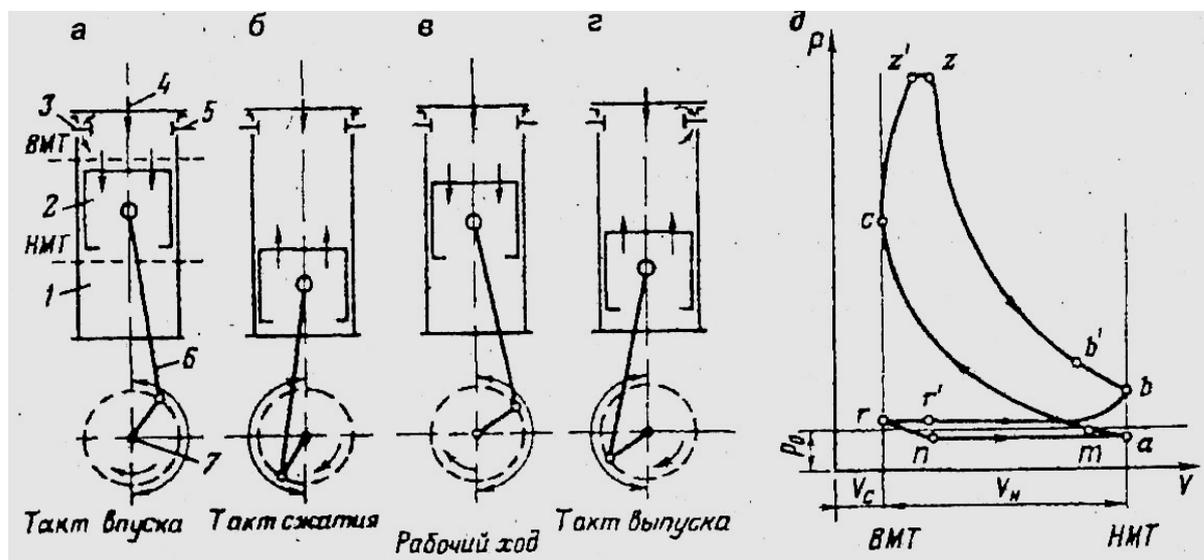


Рис. 3.5. Схемы (а – д) и рабочий процесс (е) четырехтактного ДВС: 1 – цилиндр; 2 – поршень; 3, 5 – впускной и выпускной клапаны; 4 – свеча или форсунка; б – шатун; 7 – коленчатый вал

В конце сжатия происходит воспламенение топливно-воздушной смеси от электрической искры (бензиновые, газовые двигатели) или самовоспламенение впрыснутого в цилиндр дизельного топлива (дизели). Далее поршень перемещается от ВМТ к НМТ при закрытых клапанах, осуществляются процессы сгорания $c - z' - z$, расширения $z - b$ и при открытом выхлопном клапане – выхлоп $b' - b$ (рис. 3.5, д). Третий ход поршня называется *рабочим*.

Затем поршень двигается от НМТ к ВМТ при открытом выхлопном клапане, выталкиваются продукты сгорания (рис. 3.5, з, линия $b - r$). Четвертый ход поршня называется тактом выпуска (выталкивания). В конце четвертого хода при открытом выхлопном клапане (он закрывается с запаздыванием после прохождения поршнем ВМТ) с опережением, т.е. до прихода поршня в ВМТ, открывается всасывающий клапан. Таким образом, около ВМТ какой-то период времени открыты одновременно всасывающие и выхлопные клапаны (перекрытие клапанов $r' - r - n$); в это время осуществляются продувка камеры сгорания цилиндра, ее интенсивная очистка от отработавших газов.

3.6. Работа двигателя с восьмью тактами

Кроме двух- и четырехтактных двигателей бывают двигатели специальной конструкции, работающие по циклу из пяти, шести и восьми тактов [5]. Рассмотрим, как организован цикл, состоящий из восьми тактов. Напомним, что такт в одном цилиндре следует понимать как движение поршня от одной мертвой точки до другой (например, от НМТ до ВМТ).

Дополнительные такты добавляют к четырем тактам традиционного цикла с целью реализовать продолженное расширение рабочего тела или обеспечить дополнительный отвод (рекуперацию) теплоты от деталей цилиндра-поршневой группы.

На рис. 3.6 показан двигатель, работающий по восьмитактному циклу, изобретенный в канадской компании Revelation Power [5].

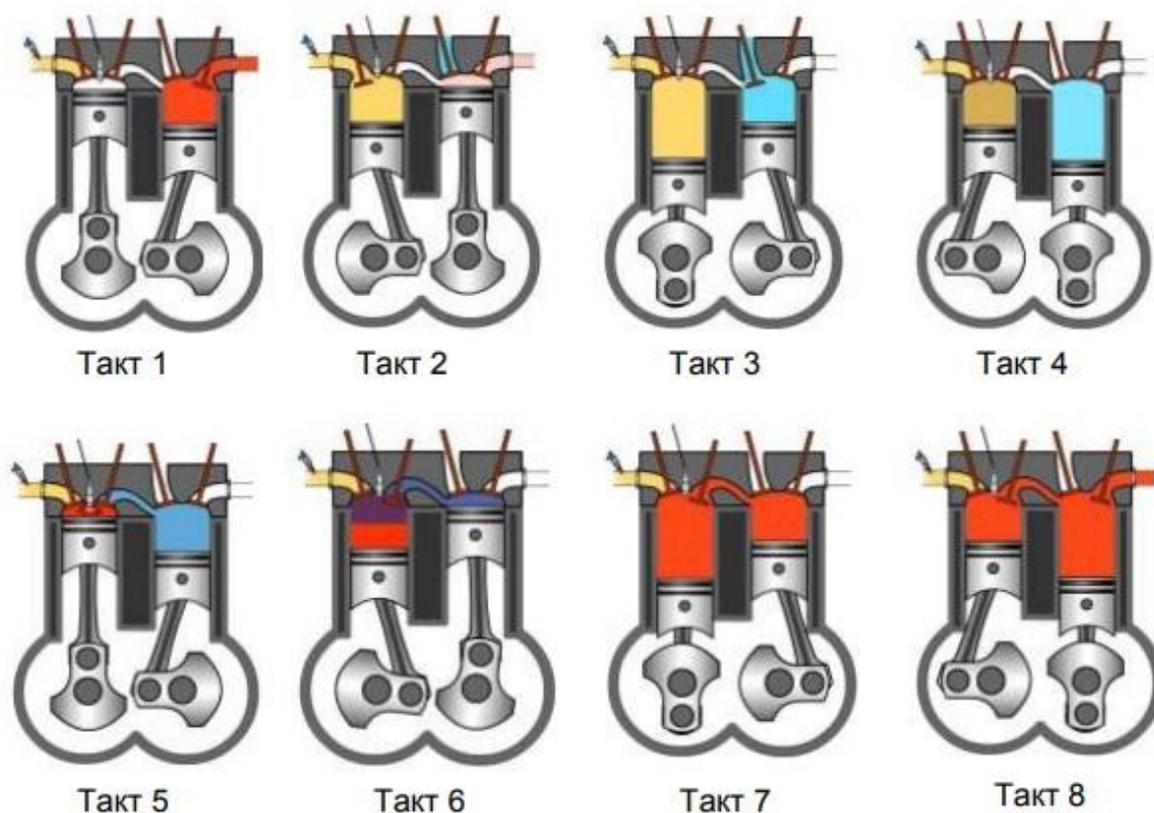


Рис. 3.6. Двухцилиндровый двигатель, работающий по циклу, который состоит из восьми тактов

Поршень второго (правого) цилиндра движется с запаздыванием на 90° относительно первого (левого) цилиндра. Первый цилиндр оснащен впускным клапаном для подачи топливно-воздушной смеси и перепускным клапаном, соединяющим первый и второй цилиндры. Второй цилиндр имеет впускной клапан для подачи воздуха и выпускной клапан,

для удаления отработавших газов. Рабочий цикл двигателя осуществляется за два оборота коленчатого вала. Последовательность тактов рабочего цикла двигателя Revelation Power показана на рис. 3.6.

Такт 1. Поршень первого цилиндра движется вниз, а поршень второго цилиндра – вверх. В первом цилиндре двигателя происходит наполнение топливно-воздушной смесью (ТВС), а во втором цилиндре – выпуск отработавших газов. В процессе завершения такта 1 поршень второго цилиндра достигает ВМТ и второй выпускной клапан закрывается.

Такт 2. В первом цилиндре продолжается наполнение, которое завершается при достижении поршня НМТ. Во второй цилиндр начинает поступать воздух, забирая теплоту от стенок первого цилиндра.

Такт 3. В первом цилиндре завершается наполнение и начинается сжатие ТВС. Второй цилиндр продолжает наполняться воздухом.

Такт 4. В первом цилиндре завершается сжатие ТВС. Во втором цилиндре завершается его наполнение воздухом.

Такт 5. В первом цилиндре при нахождении поршня около ВМТ происходит воспламенение ТВС от искры свечи зажигания. Во втором цилиндре начинается сжатие воздуха.

Такт 6. В первом цилиндре начинает сгорание ТВС и происходит расширение газов (поршень под действием давления движется к НМТ), а во втором цилиндре завершается сжатие воздуха.

Такт 7. Первый и второй цилиндры сообщаются друг с другом при открытом перепускном клапане, и происходит совместное расширение рабочего тела (газа) в двух цилиндрах. Воздух из второго цилиндра разбавляет газы в первом цилиндре.

Такт 8. Отработавшие газы удаляются из первого и второго цилиндров.

Двигатели с добавленными тактами имеют лучшую топливную экономичность за счет продолженного расширения рабочего тела и утилизации теплоты от нагретых поверхностей камеры сгорания.

Содержание отчета

1. Название, цели и задачи работы.
2. Устройство и принцип работы двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой.
3. Работа двухтактного двигателя с клапанно-щелевой продувкой (выполнить рис. 3.4, а; построить индикаторную диаграмму с пояснением на ней характерных точек).
4. Принцип работы четырехтактного двигателя (выполнить рис. 3.4, описать протекание всех тактов).
5. Выполнить индикаторную диаграмму (рис. 3.5, д) четырехтактного двигателя с пояснением характерных точек.
6. Дать краткое описание работы двигателя с восьмью тактами.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Для какой цели служит кривошипно-шатунный механизм?
2. Какую функцию выполняет газораспределительный механизм?
3. Для чего служит система охлаждения двигателя и как она работает?
4. Поясните назначение системы смазки, питания, зажигания двигателя?
5. Поясните, как работает двухтактный двигатель с кривошипно-камерной продувкой.
6. Укажите особенности работы двухтактного двигателя с клапанно-щелевой продувкой
7. Поясните принцип работы четырехтактного бензинового или дизельного двигателя.
8. Дайте краткое описание работы двигателя с восьмью тактами.
9. Преимущества и недостатки двухтактных, четырехтактных и восьми-тактных двигателей.

Практическая работа № 4

РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Цели и задачи практической работы

Цели практической работы: формирование и закрепление знаний по разделу «Расчет показателей, характеризующих техникий уровень двигателей».

Задачи: приобрести навыки по расчетному определению показателей рабочего процесса и технического уровня двигателей, рассчитать показатели технического уровня заданного типа двигателя.

4.2. Основные технические показатели двигателей

Двигатель – устройство, преобразующее какой-либо вид энергии в работу. **Тепловой двигатель** – устройство, преобразующее тепловую энергию в работу. **Двигатель внутреннего сгорания** – устройство, внутри рабочего объёма которого происходит сжигание топлива (например, бензина), выделение теплоты, повышение давления и преобразование данной энергии в механическую работу.

Энергия (от греч. – действие) – общая мера различных форм движения, рассматриваемых в физике. Единицей энергии является джоуль (Дж). Энергия может быть внутренняя (тепловая), потенциальная, кинетическая, магнитная, ядерная.

Работа – величина, характеризующая преобразование энергии из одной формы в другую. Единицей работы является джоуль (Дж).

Мощность – это работа, выполняемая за единицу времени.

$$N = \frac{A}{\tau}, \text{ Вт.} \quad (4.1)$$

При поступательном движении поршня работа равна произведению силы F на перемещение ΔL

$$A = F \cdot \Delta L, \text{ Н} \cdot \text{ м.} \quad (4.2)$$

Давление представляет собой нормальную силу F , действующую на единицу площади S

$$P = \frac{F}{S}, \text{ (Па или Н / м}^2\text{)}. \quad (4.3)$$

Сила, действующая на поршень, определяется по формуле

$$F = P \cdot S,$$

а механическая работа из выражения

$$A = P \cdot S \cdot \Delta L = P \cdot \Delta V = P \cdot Vh, \quad (4.4)$$

где Vh – рабочий объём цилиндра.

Для поршневых двигателей внутреннего сгорания

$$A = P \cdot i \cdot Vh, \quad (4.5)$$

где i – число цилиндров.

Угол поворота коленчатого вала двигателя и время определяются выражением

$$\varphi = 6 \cdot n \cdot \tau, \quad (4.6)$$

где n – частота вращения, мин^{-1} ; τ – время, с.

Время одного цикла четырехтактного двигателя

$$\tau = \varphi / 6 n = 720 / 6 n = 120 / n.$$

Эффективную мощность двигателя можно определить по формуле

$$N_e = \frac{P_e \cdot i \cdot Vh \cdot n}{120} = \frac{P_e \cdot i \cdot Vh \cdot n}{30 m}, \quad (4.7)$$

где m – тактность двигателя (у четырёхтактного – 4, двухтактного – 2).

Из анализа формулы (4.7) следует, что при постоянном значении числа цилиндров i рабочего объёма Vh величину N_e можно увеличить, повышая n и P_e . Величина P_e представляет собой среднее эффективное давление, которое за один такт (ход поршня) совершает работу, равную работе, выполняемой переменным давлением в цилиндре за весь цикл.

Номинальная мощность – эффективная мощность дизеля при номинальной частоте вращения, положении органов управления регулятора частоты вращения, соответствующем полной подаче топлива, стандартным атмосферным условиям, температуре и плотности топлива. Дизель не оборудуется вентилятором, воздухоочистителем, глушителями шума и выпуска, искрогасителем, выпускной трубой.

Мощность нетто – мощность, развиваемая дизелем при номинальной частоте вращения, но при комплектации дизеля всем необходимым для нормальной работы оборудованием (генератором, вентилятором, ра-

диатором системы охлаждения и смазки, воздухоочистителем, глушителем шума, нейтрализатором отработавших газов).

Давление – это физическая величина, характеризующая интенсивность сил, действующих на поверхность тела. Давление (Н/м^2 , Па) определяется отношением нормальной силы к единице площади:

1 техн. атмосфера = $1 \text{ кгс/см}^2 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа} = 736 \text{ мм рт. ст.} = 10 \text{ м}$ водяного столба. На рис. 4.1 показаны виды давлений.

Давление называют атмосферным, избыточным, абсолютным, вакуумметрическим. Недостаток давления до атмосферного называют вакуумметрическим. Давление больше атмосферного является избыточным. В цилиндрах ДВС работу совершает избыточное давление, воздействуя на площадь поршня.

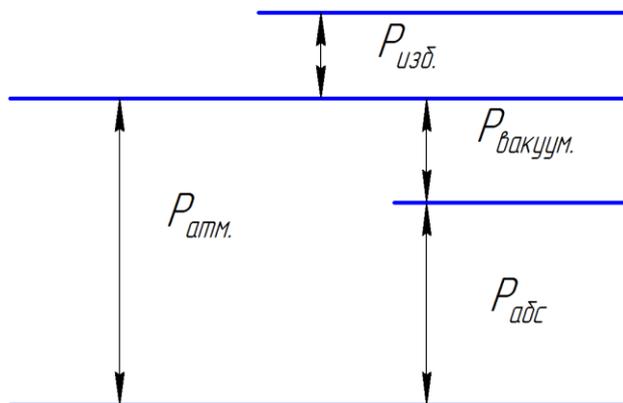


Рис. 4.1. Виды давлений

Мертвые точки. При перемещении поршня в цилиндре различают два крайних его положения: наиболее удаленное от оси коленчатого вала (рис. 4.2) – **верхняя мертвая точка (ВМТ)** и минимально удаленное от оси коленчатого вала – **нижняя мертвая точка (НМТ)**. В мертвых точках поршень некоторое время не движется, хотя коленчатый вал продолжает вращение.

Ход поршня (S) – перемещение поршня от ВМТ до НМТ или обратно. Для нормального кривошипно-шатунного механизма ход поршня соответствует половине оборота коленчатого вала и равен двум радиусам кривошипа ($S = 2r$). $S/D < 1$ – двигатель называют *короткоходным*, $S/D = 1$ – *квадратным*; $S/D > 1$ – *длинноходным*.

Средняя скорость поршня

$$C_{n. cp} = S \cdot n / 30, \text{ м/с}, \quad (4.8)$$

где S – ход поршня, м; n – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} .

Рабочий цикл – совокупность последовательных тактов (впуск, сжатие, рабочий ход, выпуск), периодически повторяющихся в каждом рабочем цилиндре и обуславливающих работу двигателя. Цикл в термодинамике (греч. круг) – круговой процесс. Цикл в технике – совокупность периодически повторяющихся процессов, при которых система вновь возвращается в исходное состояние.

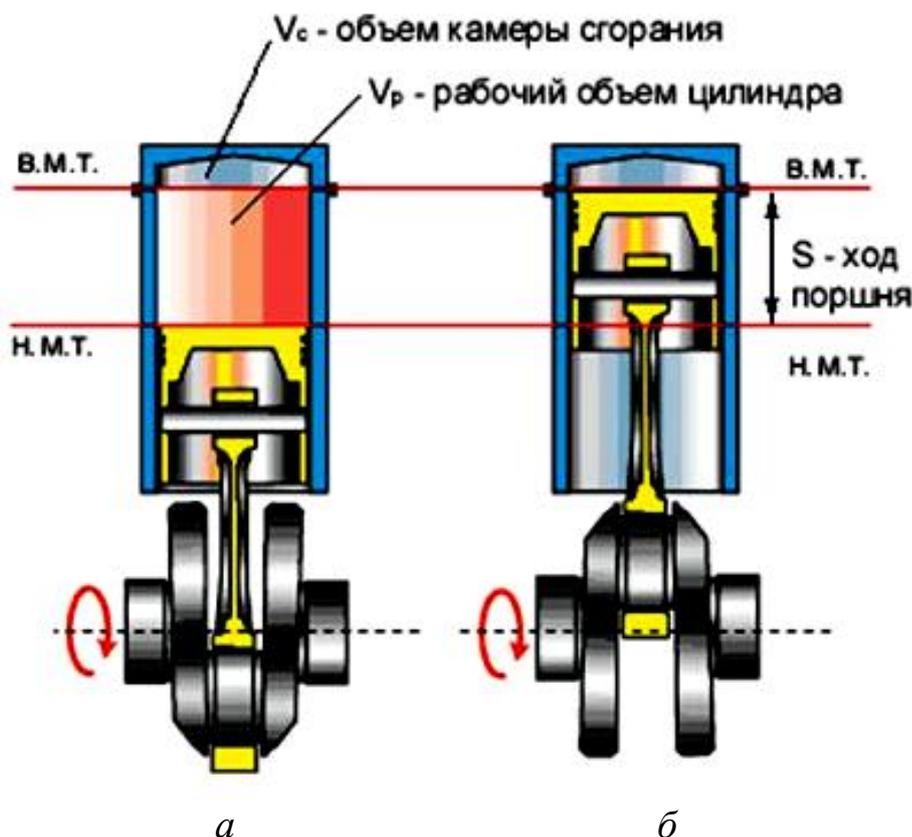


Рис. 4.2. Положение кривошипно-шатунного механизма в положении НМТ (а) и ВМТ (б)

Такт – рабочие процессы, совершаемые в течение одного рабочего хода (часть рабочего цикла).

Рабочий объём – объём, в л, описываемый поршнем за ход при его перемещении от ВМТ до НМТ,

$$V_h = (\pi \cdot D^2 / 4) \cdot S / 1000, \quad (4.9)$$

где D – диаметр цилиндра, см; S – ход поршня, см (см. рис 4.2). Делим на 1000, чтобы V_h преобразовать в л.

Объём камеры сжатия (сгорания) V_c – объём внутренней полости цилиндра при положении поршня в ВМТ, л.

Полный объём $V_a = V_h + V_C$ – объём внутренней полости цилиндра при положении поршня в НМТ, л.

Литраж двигателя – сумма рабочих объёмов всех цилиндров, л,

$$V_L = V_h \cdot i, \quad (4.10)$$

где i – число цилиндров.

Степень сжатия – отношение полного объёма цилиндра к объёму камеры сжатия, $\varepsilon = V_a/V_C$. Степень сжатия у современных карбюраторных (бензиновых) и газовых двигателей лежит в пределах $\varepsilon = 6 - 13$, у дизелей – $\varepsilon = 13 - 22$. От численного значения степени сжатия зависит мощность и экономичность двигателя. При повышении степени сжатия увеличивается индикаторный коэффициент полезного действия, но это приводит к росту механических потерь.

Действительная степень сжатия ε' – отношение объёма полости цилиндра в момент закрытия органов газораспределения, закрывающихся последними, к объёму камеры сжатия: $\varepsilon' = [V_C + (1-\psi)V_h]/V_C$, ψ – потерянная доля хода.

Коэффициент наполнения – отношение количества действительно поступившего заряда в цилиндр L_D к теоретически возможному при температуре T_k и давлении P_k с плотностью ρ_k :

$$\eta_v = L_D / (\rho_k \cdot V_h). \quad (4.11)$$

Коэффициент избытка воздуха характеризует состав горючей смеси и определяется как отношение действительного количества воздуха, поступившего в цилиндр, к теоретически необходимому для сгорания 1 кг топлива: $\alpha = L_D / L_T = L_D / (Gm \cdot L_o)$, Gm – часовой расход топлива, кг/ч, L_o – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива ($L_o = 14,96$ кг воздуха / кг топлива для бензина, $L_o = 14,45$ кг воздуха / кг топлива для дизельного топлива).

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$, когда $L_D = L_T$. Если $\alpha > 1$, смесь бедная, если $\alpha < 1$, то смесь богатая (для бензиновых двигателей). Для дизельных двигателей на режиме номинальной мощности величина $\alpha = 1,6 - 2,0$, а на режиме холостого хода – $6 - 8$.

Индикаторные показатели характеризуют показатели цикла. Индикатор (лат. указываю, определяю) – устройство, отражающее ход процессов.

Индикаторная диаграмма – графическая зависимость давления в цилиндре от изменения объема цилиндра, хода поршня или угла поворота коленчатого вала. Индикаторная диаграмма в ДВС записывается на бумаге при помощи мембранных датчиков давления (тензо или пьезо) с использованием усилителей и осциллографов.

На рис. 4.3 представлена теоретическая индикаторная диаграмма бензинового двигателя без наддува.

Индикаторная работа цикла Li – площадь (в масштабе), ограниченная индикаторной диаграммой, Дж.

Среднее индикаторное давление – условное постоянное давление P_i , совершающее в течение одного рабочего хода поршня такую же работу, что и переменное давление газов за цикл Li (высота прямоугольника с основанием, равным V_h , и площадью, равной площади индикаторной диаграммы).

$$P_i = Li / V_h, \text{ МПа.} \quad (4.12)$$

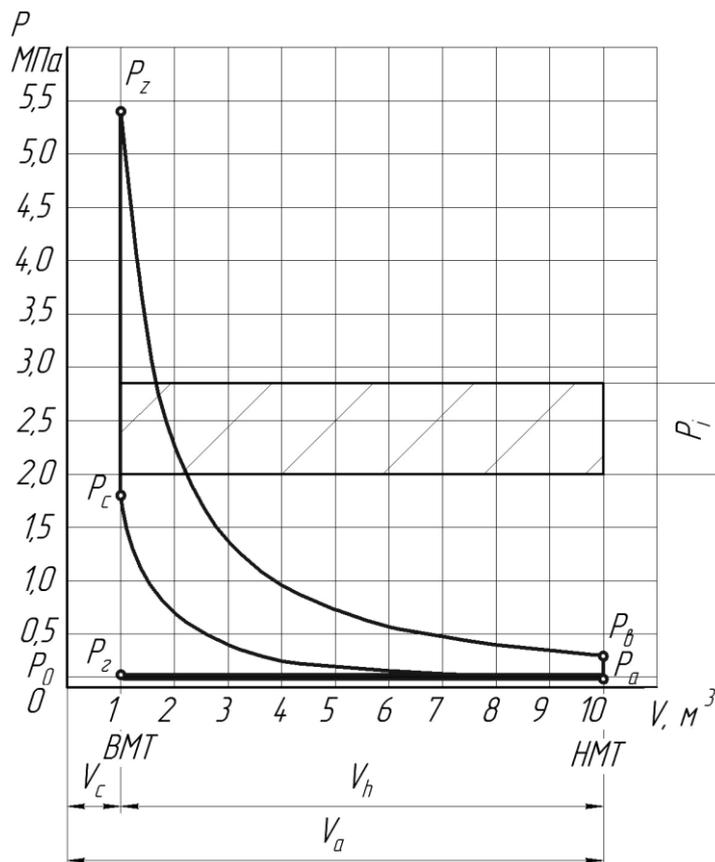


Рис. 4.3. Теоретическая индикаторная диаграмма

Индикаторная мощность (мощность, развиваемая внутри цилиндров)

$$N_i = i \cdot V_h \cdot P_i \cdot n / (30 \cdot m) \text{ кВт,} \quad (4.13)$$

где V_h – рабочий объём цилиндра, л; P_i – среднее индикаторное давление, МПа; m – тактность (4 – четырехтактный, 2 – двухтактный ДВС); n – частота вращения, мин⁻¹; i – число цилиндров.

Мощность – это работа, выполняемая за единицу времени.

Эффективные показатели.

Эффективная мощность N_e – мощность, снимаемая с коленчатого вала двигателя, кВт.

$$N_e = M_e \cdot n / 9550 \text{ кВт}, \quad (4.14)$$

где M_e – средний крутящий момент, Н·м.

Мощность механических потерь

$$N_m = N_i - N_e, \text{ кВт}. \quad (4.15)$$

Среднее эффективное давление

$$P_e = N_e \cdot 30 m / (i \cdot V_h \cdot n), \text{ МПа}, \quad (4.16)$$

где V_h – рабочий объём, л; P_i – среднее эффективное давление, МПа; m – тактность; n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

Удельный эффективный расход топлива

$$g_e = G_m / N_e, \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}, \quad (4.17)$$

где G_m – часовой расход топлива, кг/ч; N_e – эффективная мощность, кВт.

Литровая мощность – мощность, приходящаяся на 1 л рабочего объёма всех цилиндров двигателя (литража),

$$N_l = N_e / V_l, \text{ кВт/л}. \quad (4.18)$$

Удельная масса – масса двигателя, приходящаяся на единицу эффективной мощности,

$$m_y = M_{ог} / N_e, \text{ кг/кВт}. \quad (4.19)$$

Литровая масса – масса двигателя, отнесенная к литражу,

$$m_l = M_{ог} / V_l, \text{ кг/л}. \quad (4.20)$$

Удельная мощность – мощность, отнесенная к 1 т массы транспортного средства M_m

$$N_y = N_e / M_m, \text{ кВт/т.} \quad (4.21)$$

4.3. Маркировка поршневых двигателей

Поршневым двигателям, включая и двигатели автотракторного типа, согласно ГОСТу присваивают маркировку из букв и цифр, например: 8ЧР 30/38; 6ДК 30/40 или 9ДКР 45/60-2; 4Ч 7,9/8,0 (ВАЗ-2106), где буквы обозначают: Ч – четырехтактный, Д – двухтактный, ДД – двухтактный двойного действия, Р – реверсивный (направление вращения изменяется специальным реверсивным устройством); С – судовой с реверсивной муфтой, П – с редукторной передачей, К – крейцкопфный, Н – с наддувом. Первая цифра обозначит число цилиндров; цифра над чертой – диаметр цилиндра в сантиметрах, а число под чертой – ход поршня в сантиметрах; последняя цифра в маркировке характеризует модернизацию двигателя.

В табл. 4.1 приведены технические характеристики отечественных двигателей.

Таблица 4.1

Технические характеристики двигателей

Модель	различных заводов				ЯМЗ		КамАЗ	
	ЗМЗ-405	Д-240	Д21А	ВАЗ-2110	236	238	740	741
Число и расположение цилиндров	4Р 0°	4Р 0°	2Р 0°	4Р 0°	6V 90°	8V 90°	8V 90°	8V 90°
Диаметр цилиндра, мм	92	105	105	82	130	130	120	120
Ход поршня, мм	86	120	120	71	140	140	120	120
Мощность, кВт	114	60	18,4	54	132	176	154	190
Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	5200	1800	1800	5600	2100	2100	2600	2200
Часовой расход топлива, кг/ч	8,2	12,8	4,4	7,5	30,5	39,4	33,6	40
Масса двигателя, кг	200	400	280	130	843	1010	770	800

В табл. 4.2 приведены характеристики отечественных и зарубежных двигателей.

Таблица 4.2

Характеристики отечественных и зарубежных двигателей

Страна, фирма, модель двигателя	Расположение и число цилиндров	Литраж двигателя, л	Диаметр цилиндра и ход поршня, мм	Мощность, кВт /частота вращения, мин ⁻¹	Максимальный крутящий момент, частота вращения, Н·м/мин ⁻¹	Минимальный удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	Литровая мощность, кВт /л
Россия, ОАО «Барнаултрансмаш» 4ТД1,6	P4	1,8	82* 84	90/ 4000	257/ 1800	210	50
Россия ОАО «ЗМЗ» 43.51430	P4	2,23	87/ 94	100/ 4200	284/ 2500	198	44.8
Россия, ОАО «Автодизель», ЯМЗ- 534	4P	3,94	102* 122	125/ 2300	650/ 1400	193	31.7
Россия, ОАО «Автодизель», ЯМЗ- 536	V6	5,99	102/ 122	176/ 2300	1020/ 1400	193	29.4
Россия, ОАО «КамАЗ»	V6	9,5	120/ 140	257/ 2000	1500/ 1100	197	27
Россия, ОАО «КамАЗ», ОАО «Автодизель»	V8	11,9	130* 150	367/ 1900	2200/ 1000	194	30.8
Россия, ОАО «Автодизель», ЯМЗ -260	V8	11,1	130* 140	286/ 1900	1760/ 1100	194	25.7
Россия, ОАО «Автодизель», ЯМЗ - 751	V8	14,3	130* 140	386/ 1900	2370/ 1100	194	27
Россия, ОАО «КамАЗ» 340.8-450	V8	12,3	120/ 136	330/ 1800	1750/ 1100	197	26.8
Россия, ОАО «ТМЗ»	V8	17,2	140* 140	368/ 2100	1960/ 1400	197	21.4
Россия, ОАО «Автодизель», ЯМЗ- 401	V12	25,8	140* 140	478 2100	2450/ 1300	206	25,1
Германия, Mercedes-Benz	P4	2,18	88* 88,3	105 1800	315/ 1800	200	48
Франция, Renault, DC-14	P4	4,12	102* 126	138 2400	560/ 1800	182	33.4

Содержание отчета

1. *Название, цели и задачи работы.*
2. *Сформулировать основные термины и определения ДВС.*
3. *Привести в качестве примера маркировку двигателей.*
4. *Расчетным путем определить показатели технического уровня заданного двигателя согласно табл. 4.1 и 4.2:*
 - 4.1. *Среднюю скорость поршня;*
 - 4.2. *Рабочий объем и литраж двигателя;*
 - 4.3. *Среднее эффективное давление;*
 - 4.4. *Удельный эффективный расход топлива;*
 - 4.5. *Литровую и поршневую мощность;*
 - 4.6. *Удельную и литровую массу.*
5. *Выводы по работе.*

Контрольные вопросы и задания

1. *Поясните, что называют циклом, тактом?*
2. *Для какой цели служит кривошипно-шатунный механизм?*
3. *Что называют степенью сжатия?*
4. *Поясните термин «среднее индикаторное давление»?*
5. *Что называют рабочим объемом, литражом?*
6. *Поясните, что называют индикаторной и эффективной мощностью?*
7. *Что называют коэффициентом наполнения, коэффициентом избытка воздуха?*
8. *Поясните, как определяется средняя скорость движения поршня?*
9. *Что называют часовым и удельным эффективным расходом топлива?*
10. *Поясните марку двигателя 8ЧН 12/13?*
11. *Что называют нижней и верхней мертвыми точками поршня и ходом поршня?*

Практическая работа № 5

РОТОРНО-ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

5.1. Цели и задачи практической работы

Цели практической работы: формирование и закрепление знаний по разделу «Роторно-поршневой двигатель».

Задачи: изучить устройство двигателя Ванкеля и его принцип действия.

5.2. Устройство и принцип действия роторно-поршневых двигателей

Роторные двигатели применяют в основном на автомобилях. Эти двигатели характеризуются малой удельной массой, отсутствием возвратно-поступательно движущихся частей (в отличие от поршневых ДВС), большей частотой вращения вала. Поэтому роторно-поршневые двигатели при равной мощности обычно легче и компактнее обычных поршневых двигателей.

Первый работоспособный роторный двигатель был создан Ванкелем (ФРГ) в 1957 г., хотя принцип использования вращающегося поршня был известен еще в XVI веке. На рис. 5.1 показан портрет Феликса Ванкеля в руках с поршнем-ротором своего двигателя.



Рис. 5.1. Изобретатель роторно-поршневого двигателя Феликс Генрих Ванкель (1902 – 1988, Германия)

На рис. 5.2 показана схема двигателя Ванкеля (роторно-поршневого), поясняющая его устройство. На рис. 5.3 представлен разрез, показывающий камеру с впускным и выпускным отверстиями и поршень-ротор.

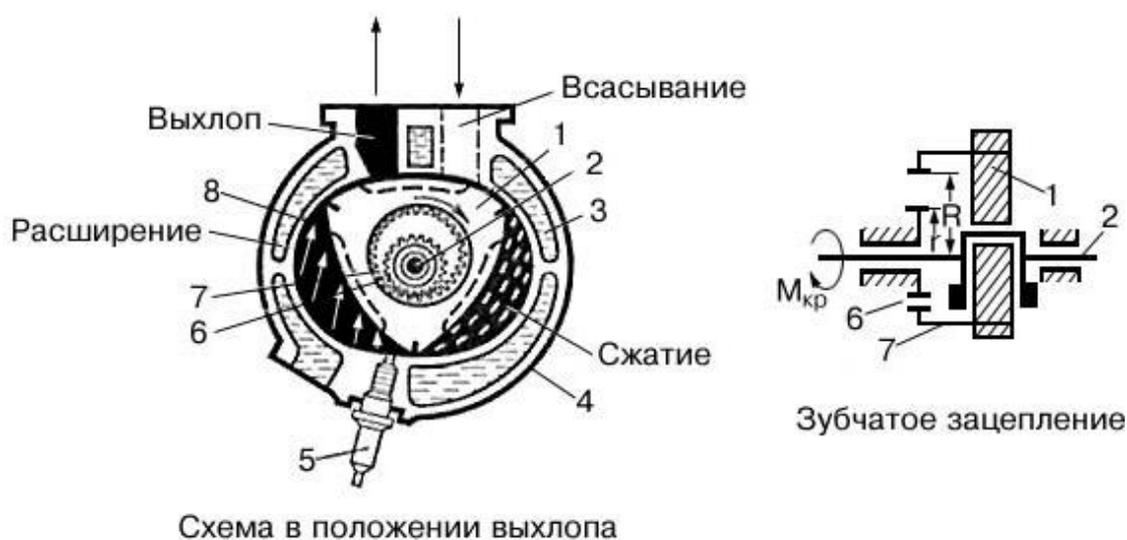


Рис. 5.2. Разрез роторно-поршневого двигателя:

- 1 – вращающийся ротор (поршень); 2 – вал с кривошипом и противовесами;
 3 – водяное охлаждение; 4 – корпус; 5 – свеча зажигания; 6 – шестерня неподвижная;
 7 – зубчатое колесо, жестко связанное с ротором; 8 – камера



Рис. 5.3. Двигатель Ванкеля с видом поршня (ротора)

В роторно-поршневых двигателях весь рабочий процесс – впуск рабочей смеси, сжатие, рабочий ход, выпуск отработавших газов – осуществляется при изменении объёмов полостей, которые образуются между корпусом и треугольной формы ротором, совершающим сложное планетарное движение. Внутренняя полость корпуса двигателя имеет сложную форму. Вращающийся ротор (поршень) имеет форму треугольника. Контакт наружной поверхности ротора с поверхностью полости корпуса происходит по кривой линии, которая называется **эпициклоида**. Эпициклоида (от греч. *epi* – на и *kukloeides* – кругообразный, круглый) – кривая, описываемая точкой подвижной окружности, которая (точка) снаружи касается неподвижной окружности и катится по ней без скольжения.

Основными элементами роторно-поршневого двигателя являются корпус, эксцентриковый вал отбора мощности и установленный на нем ротор. Корпус с торцов закрыт двумя крышками. На эксцентриковом валу с двух сторон располагаются маховики-противовесы, которые служат для уравнивания центробежных сил, возникающих при вращении ротора вокруг оси эксцентрикового вала.

Сложное планетарное движение трехгранного ротора обеспечивается двумя шестернями, одна из которых – малая – неподвижно укреплена в корпусе двигателя, а другая – большая – соединена с ротором. Передаточное отношение r/R равно 2:3 (см. рис. 5.2). При качении большой шестерни вокруг малой центр большой шестерни описывает окружность радиусом, равным эксцентриситету эксцентрика. Ротор при вращении эксцентрикового вала совершает сложное движение.

С каждой стороны ротора устанавливаются по три торцовых уплотнения. Уплотняющие пластины прижимаются к поверхности корпуса пластинчатыми пружинами. Нарушение уплотнения в какой-либо полости может вызвать прорыв горячих газов и воспламенение свежего заряда в соседней полости.

Вследствие непрерывного изменения наклона уплотняющей пластины относительно поверхности корпуса контакт пластины с поверхностью происходит по линии. Поэтому поверхности уплотнения и корпуса двигателя быстро изнашиваются, и срок службы роторно-поршневого двигателя меньше срока службы поршневого ДВС. Утечки рабочего тела из полости сгорания у роторного двигателя больше по сравнению с утечками в обычном двигателе. При износе уплотнений выходит из строя весь двигатель.

На рис. 5.4 показан общий вид двигателя Ванкеля.

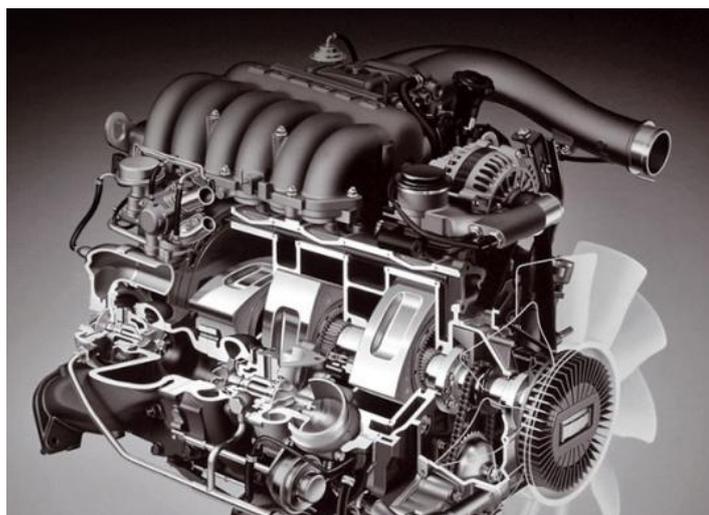


Рис. 5.4. Общий вид двигателя Ванкеля

На рис. 5.5 показан в разобранном виде двигатель Ванкеля с двумя роторами.



Рис. 5.5. Двигатель Ванкеля в разобранном виде

Принцип работы роторно-поршневого двигателя становится понятным из анализа рис. 5.6 и 5.7.

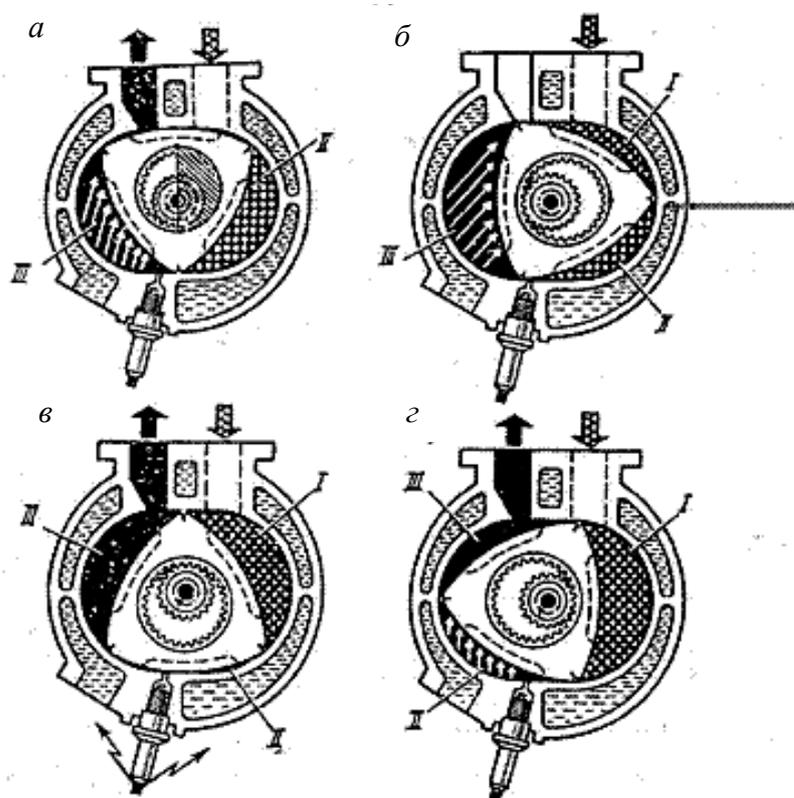


Рис. 5.6. Принцип работы роторно-поршневого двигателя Ванкеля

В полости III (рис. 5.6, *a*) происходит сгорание смеси и расширение газов. В полости I заканчивается выпуск и начинается процесс впуска, а в полости II смесь сжимается. Когда поршень проворачивается в положение (рис. 5.6, *б*), в полости III заканчивается расширение продуктов сгорания, а в положении (рис. 5.6, *в*) из полости III начинается выпуск продуктов сгорания. Одновременно электрическая искра, проскакивающая между электродами свечи, воспламеняет смесь, сжатую в полости II. На рис. 5.6, *г* показано положение поршня, соответствующее началу рабочего хода в полости II.

Степень сжатия у роторно-поршневого двигателя лежит в пределах 8 – 10, а топливом является бензин.

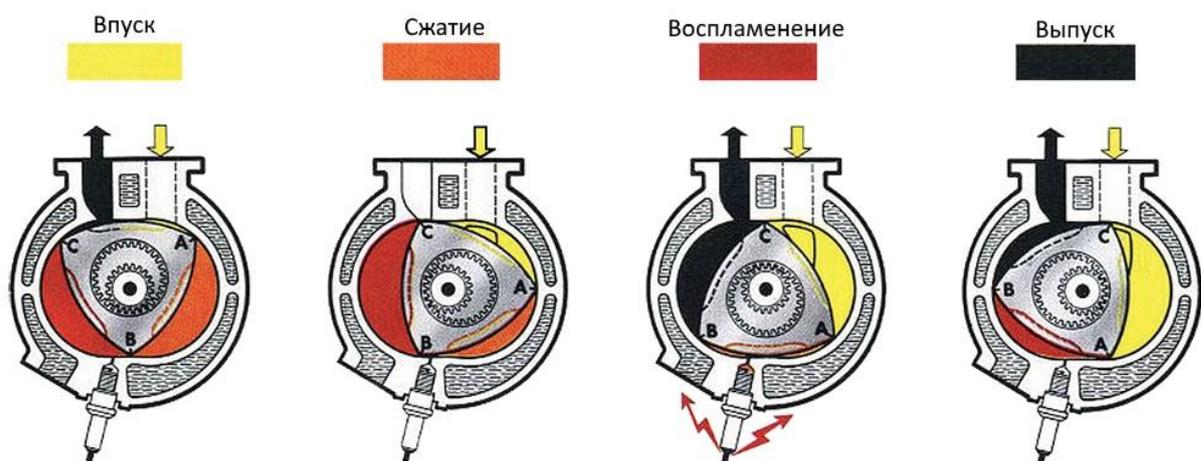


Рис. 5.7. Схема работы роторного двигателя

При работе роторно-поршневого двигателя происходит тепловая деформация корпуса вследствие неравномерного его нагрева, что приводит к увеличению износа элементов уплотнения. Для уменьшения деформации корпуса его интенсивно охлаждают в области сгорания и подбирают соответствующие материал и толщину стенок корпуса. Вследствие интенсивного нагрева ротора его тоже следует охлаждать. Для охлаждения ротора используют топливоздушную смесь и масло. Последнее сильно нагревается и для его охлаждения необходимо иметь мощные радиаторы. Удельный расход топлива в роторно-поршневых двигателях составляет 310 – 370 г/ (кВт·ч).

Токсичность выпускных газов роторных двигателей несколько меньше токсичности выпускных газов поршневых ДВС, но выше норм для автомобильных ДВС. Применение тех или иных способов уменьшения токсичности выпускных газов роторных двигателей приводит к их усложнению и снижению экономичности.

Содержание отчета

- 1. Название, цели и задачи работы.*
- 2. Вычертить схему двигателя Ванкеля (рис. 5.2).*
- 3. Устройство и принцип работы роторно-поршневого двигателя Ванкеля .*
- 4. Вычертить кривую линию эпициклоиды, по которой совершает сложное движение поршень-ротор.*
- 5. Выполнить рис. 5.6 и описать такты при повороте ротора на 360° .*
- 6. Выводы по работе.*

Контрольные вопросы и задания

- 1. Поясните, из каких главных частей состоит двигатель Ванкеля?*
- 2. Для какой цели служит ротор-поршень?*
- 3. Какая степень сжатия у двигателя Ванкеля?*
- 4. Что представляет собой эпициклоида?*
- 5. Как осуществляется впуск рабочей смеси (бензина с воздухом) и выпуск отработавших газов?*
- 6. Как протекает рабочий процесс в роторно-поршневом двигателе?*
- 7. Поясните назначение системы смазки, питания, зажигания двигателя?*
- 8. Укажите основные преимущества и недостатки двигателя Ванкеля при сравнении с поршневым двигателем.*

Практическая работа № 6

ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

6.1. Цели и задачи практической работы

Цели практической работы: формирование и закрепление знаний по разделу «Газотурбинные двигатели».

Задачи: ознакомиться с устройством, принципом работы газотурбинных установок (ГТУ) и турбореактивных двигателей (ТРД). Изучить принцип осуществления рабочего цикла ГТУ, преимущества и недостатки при сравнении с поршневыми двигателями внутреннего сгорания, перспективы использования.

6.2. Устройство и работа газотурбинных двигателей

Одну из простейших конструкций газотурбинного двигателя можно представить как вал, на котором находится два диска с лопатками, первый диск – компрессора, второй – турбины, в промежутке между ними установлена камера сгорания.

Принцип работы газотурбинного двигателя:

- всасывание и сжатие воздуха в лопаточном компрессоре, подача его в камеру сгорания;
- смешение сжатого воздуха с топливом для образования топливо-воздушной смеси (ТВС) и сгорание этой смеси;
- расширение газов в результате нагрева при сгорании смеси топлива с воздухом, что формирует вектор давления газа, направленный в сторону меньшего сопротивления (в направлении лопаток турбины), передача энергии (давления) газа лопатками турбины на диск или вал, в котором эти лопатки закреплены;
- привод во вращение диска турбины и вследствие этого передача крутящего момента по валу с диска турбины на диск компрессора.

Газотурбинным двигателем называется двигатель, в котором рабочим телом является газ (воздух, продукты сгорания топлива), а в качестве расширительной машины применяется газовая турбина. ГТУ состоит из трех основных узлов: компрессора, камеры сгорания и газовой турбины.

Схема газотурбинной установки (ГТУ) приведена на рис. 6.1.

В компрессор 1 газотурбинного силового агрегата поступает чистый воздух, в котором примерно 21% кислорода. Под высоким давлением воздух из компрессора направляется в камеру сгорания (КС) 2, куда

подается форсункой топливо в распыленном виде (например, керосин). Смесь топлива с воздухом воспламеняется при помощи системы зажигания. В процессе сгорания топливовоздушной смеси повышается температура и давление газа в КС. Поток газа вытекает с высокой скоростью из сопла КС и устремляется на рабочее колесо турбины 3, вращая его.

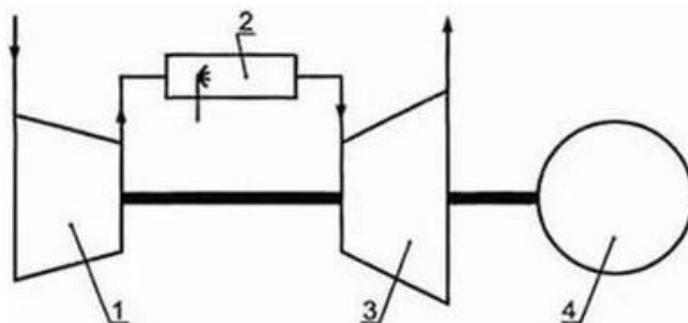


Рис. 6.1. Одновальная схема ГТУ простого цикла:
1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – турбина; 4 – потребитель

На лопатках турбины энергия газа (внутренняя, потенциальная, кинетическая) преобразуется в механическую работу. Вал турбины переходит во вращательное движение. Крутящий момент передается от турбины на вал компрессора 1, вращая его колесо. Основную часть энергии, которую преобразует турбина, поступает к потребителю 4 (например, к электрическому генератору).

На рис. 6.2 показана газотурбинная установка с разделёнными турбинами. Первая турбина обеспечивает вращение вала осевого компрессора, вторая служит для привода вала генератора или другого потребителя.

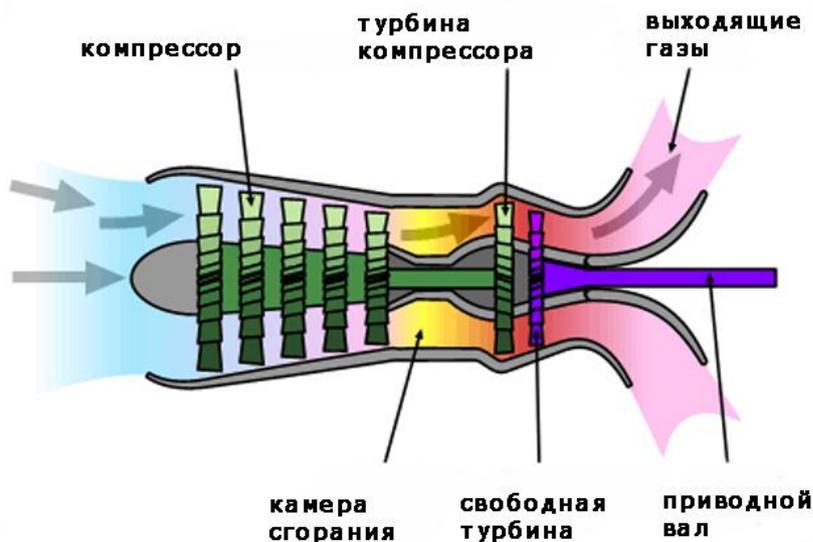


Рис. 6.2. Газотурбинная установка с приводным валом

На рис. 6.3 показана газотурбинная установка для привода винта (пропеллера) самолета (например, ИЛ-18).

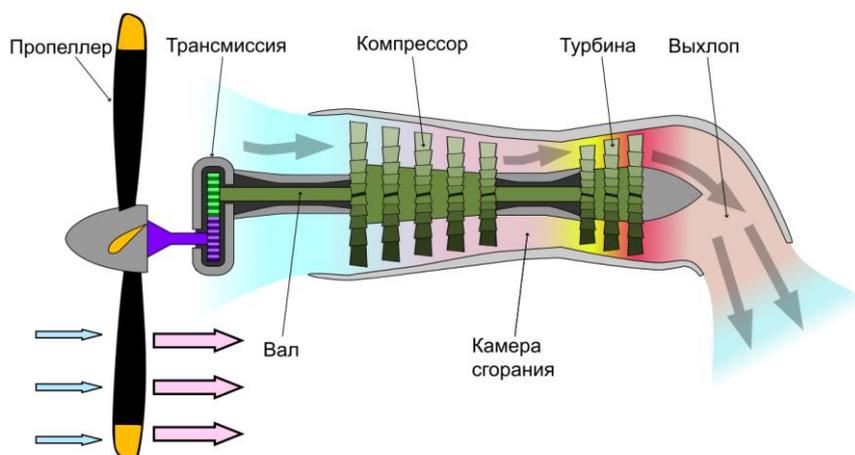


Рис. 6.3. Газотурбинная установка для привода винта самолета

На рис. 6.4 показан разрез турбореактивного двигателя для полета самолета (например, ЯК-40). В данном двигателе осевой компрессор (он расположен слева) подает сжатый воздух в камеры сгорания (они расположены в центре двигателя). В КС постоянно подается распыленное топливо (например, керосин). Топливо смешанное с воздухом воспламеняется от искры системы зажигания и горит. В КС повышается температура и давление газов, которые покидают КС и направляются на лопатки турбины. Часть энергии (до 20%) срабатывается на лопатках турбины, при помощи которой вращается ротор осевого компрессора. Основная часть энергии сгоревшего топлива выбрасывается с большой скоростью из сопла, создавая реактивную тягу.

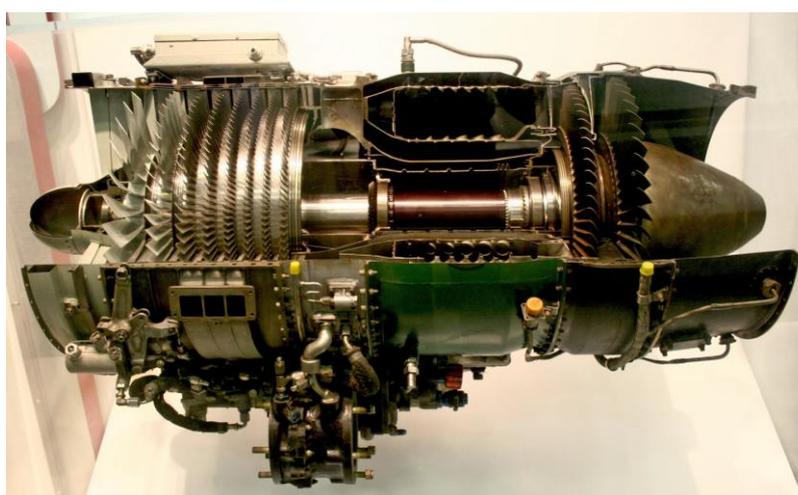


Рис. 6.4. Разрез турбореактивного двигателя

Реактивную тягу (F_T) двигателя (силу, прикладываемую к летательному аппарату, которая заставляет его двигаться) можно определить по формуле

$$F_T = M_C \cdot (C_C - C_{\Pi}), \quad (6.1)$$

где M_C – массовый секундный расход газа, выходящий из сопла двигателя, кг/с; C_C – скорость истечения газа из сопла двигателя, м/с; C_{Π} – скорость полета летательного аппарата, м/с.

Для $M_C = 20$ кг/с, $C_C = 300$ м/с; $C_{\Pi} = 0$, согласно формулы 6.1, величина F_T будет равна 6000 Н или 0,6 т.

Компрессор – машина для непрерывного сжатия воздуха или газа под давлением не ниже 0,015 МПа. В газотурбинных двигателях применяют лопаточные компрессоры (центробежные и осевые), в которых силовое воздействие на газ осуществляют вращающиеся лопатки.

В компрессоре механическая работа, полученная от турбины, превращается в кинетическую энергию рабочего тела с последующим превращением в давление (в результате расширения или диффузорного эффекта).

На рис. 6.5 показаны рабочее колеса центробежного компрессора и осевой турбины.

Различают наружный (периферийный) диаметр колеса центробежной или осевой турбины D_K . Для венца осевой турбины в расчётах важно знать диаметр диска D_D (до начала установки лопаток) и высоту лопатки h_L . Средний диаметр колеса осевой турбины D_{CP} определяют по формуле

$$D_{CP} = (D_K + D_D) / 2. \quad (6.2)$$



Рис. 6.5. Рабочие колеса центробежного компрессора и осевой турбины

Лопаточная машина – это тело вращения, оснащенное лопатками. На рис. 6.6 приведены лопатки различной формы для осевых машин.



Рис. 6.6. Формы лопаток осевых машин

Если взять кольцевое сечение с произвольным радиусом, ось которого совпадает с осью турбины, пересечь им лопаточный венец осевого компрессора (см. рис. 6.4), а полученное сечение развернуть и наложить на плоскость, то данное изображение называют **элементарной решеткой профилей** (рис. 6.7). Шагом решётки t называют расстояние между одноимёнными точками двух соседних профилей. Хордой b профиля является длина изогнутой части лопатки. Густота решётки есть отношение b/t . Лопатки, установленные в диске, который связан с приводным валом, образуют подвижный лопаточный венец – рабочее колесо.

Ступенью осевого компрессора называют совокупность двух лопаточных венцов – вращающего рабочего колеса (РК) и неподвижного направляющего аппарата (НА).

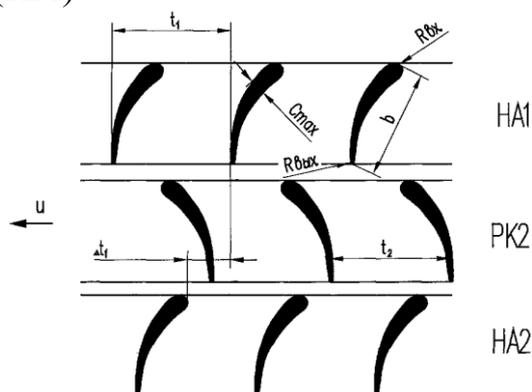


Рис. 6.7. Профиль решёток ступени осевого компрессора:
НА и РК – решетки направляющего аппарата и рабочего колеса

Лопатки направляющего аппарата (НА) неподвижны, в них только изменяется направление течения потока компрессорного воздуха с целью оптимального угла входа на рабочие лопатки. Лопатки рабочего колеса

(РК) силовым путем воздействуют на поток воздуха, увеличивая его скорость (кинетическую энергию), которая на выходе из лопаток за счет диффузорного эффекта (расширения) переходит в энергию давления. Выпуклая часть профиля лопатки называется спинкой, а вогнутая – корытцем.

6.3. Планы скоростей в лопатках компрессора и турбины

На рис. 6.8 показано изменение направления скоростей потока воздуха (план скоростей) на выходе из неподвижных направляющих лопаток (А) и входе на рабочие подвижные лопатки (Б) и выходе из них. В треугольниках скоростей следует различать окружную скорость U ; относительную скорость W (касательную к поверхности лопатки); абсолютную скорость C ; угол α между векторами скоростей U и C и угол β между векторами скоростей U и W .

Окружная скорость U (касательна к окружности колеса) рабочего колеса зависит от угловой скорости ω и среднего радиуса вращения лопатки $R_{\text{СР}}$, направлена перпендикулярна к оси вращения вала и определяется по формуле [6]

$$U = \omega \cdot R_{\text{СР}} = \pi \cdot D_{\text{СР}} \cdot n / 60, \quad (6.3)$$

где $D_{\text{СР}} = 2R_{\text{СР}}$ – диаметр колеса компрессора на средней высоте лопаток; n – частота вращения ротора компрессора, мин^{-1} .

При $n = 10\,000 \text{ мин}^{-1}$ и $D_{\text{СР}} = 0,4 \text{ м}$ величина $U = 209 \text{ м/с}$.

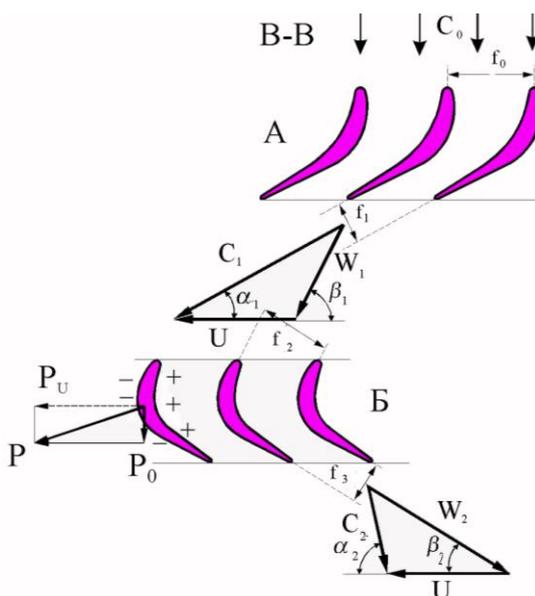


Рис. 6.8. Планы (треугольники) скоростей компрессора на входе в рабочие лопатки (Б) и выходе из них

В направляющий аппарат (он неподвижен, $U = 0$) воздух входит в осевом направлении (C_0), а выходит с абсолютной скоростью C_1 , изменив направление. Для определения величины и направления данного вектора скорости необходимо знать направление и величину относительной скорости W_1 . Она всегда касательна к поверхности лопатки (к корытцу). Её величина зависит от площади проточной части на входе и выходе из направляющего аппарата, массового секундного расхода воздуха и плотности воздуха. Рассмотрим движение потока воздуха только между лопатками направляющего аппарата.

Принимаем, что лопатки направляющего аппарата имеют одинаковые площади проходной части на входе и выходе. По этой причине считаем, что кинетическая энергия потока воздуха в межлопаточных каналах постоянна. Изменяется только направление потока воздуха. Плотность воздуха на входе и выходе из межлопаточного пространства направляющего аппарата будет

$$\rho_1 = P_1 / (R \cdot T_1), \quad (6.4)$$

где P_1 – атмосферное давление, $0,98 \cdot 10^5$ Па; T_1 – температура окружающей среды, 293 К; R – газовая постоянная для воздуха, 287 Дж / (кг · К). При данных параметрах $\rho_1 = 1,165$ кг/м³.

При диаметре диска 0,3 м, высоте лопаток 0,1 м (с учетом заграждающей площади лопаток) площадь проточной части рабочих лопаток аппарата (F_1) составит 0,07 м². Площадь проточной части направляющего аппарата принимаем равной площади проточной части рабочих лопаток. При массовом секундном расходе воздуха $M_1 = 20$ кг/с величина относительной скорости составит

$$W_1 = M_1 / (F_1 \cdot \rho_1) = 20 / (0,07 \cdot 1,165) = 245 \text{ м/с}. \quad (6.5)$$

Затем выбираем масштаб скорости (например, 1 мм равен 5 м/с). Далее с учетом величины и направления векторов скоростей U и W_1 строим две стороны будущего треугольника скоростей. Соединяя концы векторов скоростей U и W_1 , получим величину и направление абсолютной скорости C_1 .

Камера сгорания – устройство, в котором происходит непрерывное сгорание топлива при $p = \text{const}$ в потоке сжатого рабочего тела (воздуха). В результате чего к газу подводится теплота и увеличивается его температура до 2500 К. На рис. 6.9 показана схема КС трубчатого типа [6].

Продукты сгорания на выходе из КС должны иметь температуру, не превышающую допустимую. При этом в газе не должно быть сажи, час-

тиц кокса, так как они вызывают загрязнение и эрозию проточной части газовой турбины.

При горении жидкого топлива в ядре факела развивается температура около 2500 К. Такую высокую температуру, применяемые в турбостроении материалы, выдержать не могут.

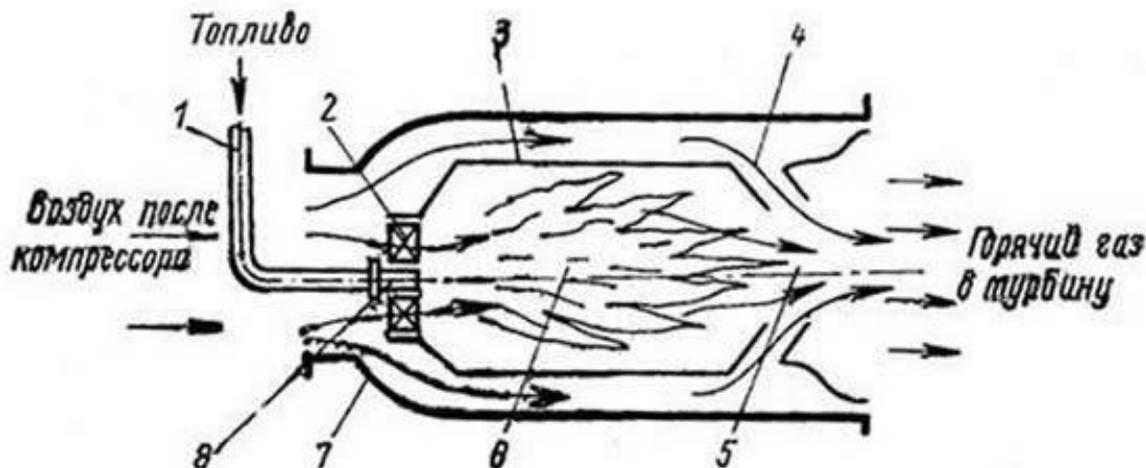


Рис. 6.9. Схема камеры сгорания ГТУ:

- 1 – топливopовод; 2 – воздухонаправляющее устройство (завихритель); 3 – жаровая труба; 4 – смеситель; 5 – зона смешения; 6 – зона горения; 7 – корпус камеры; 8 – форсунка

Температуру продуктов сгорания понижают, разбавляя их относительно холодным воздухом. Для этой цели поток воздуха перед входом в камеру сгорания разделяется на два – поток первичного и поток вторичного воздуха. Первичный воздух (примерно 1/3 от суммарного количества) подается в зону горения, а вторичный – протекает между жаровой трубой и корпусом и подмешивается постепенно по ходу к продуктам сгорания, снижая их температуру до заданного значения. Для ГТУ авиационного типа коэффициент избытка воздуха на выходе из камеры сгорания $\alpha = 4 - 5$, для стационарных ГТУ $\alpha = 6 - 10$ ($\alpha = 1$, когда 1 часть топлива смешивается с 15 частями воздуха).

На рис. 6.10 показана КС с зоной горения топлива и зоной смешения газов высокой температуры с холодным воздухом.

Газовая турбина – машина, в которой кинетическая энергия выходящего газа из сопла камеры сгорания превращается в механическую работу на лопатках турбины.

В зависимости от кратности использования рабочего тела (газа) различают газотурбинные установки (ГТУ) открытого и закрытого цикла.

В ГТУ открытого цикла наружный воздух после однократного осуществления рабочего процесса – сжатия, подвода теплоты (сгорания топли-

ва), расширения выбрасывается в атмосферу. Последующие циклы происходят с новыми порциями рабочего тела (воздуха и топлива).

В ГТУ закрытого цикла рабочее тело не меняется, а многократно сжимается, подогревается, расширяется и охлаждается, причем подогрев и охлаждение рабочего тела осуществляются в теплообменных аппаратах поверхностного типа. Рабочее тело не смешивается с продуктами сгорания топлива и окружающим воздухом.

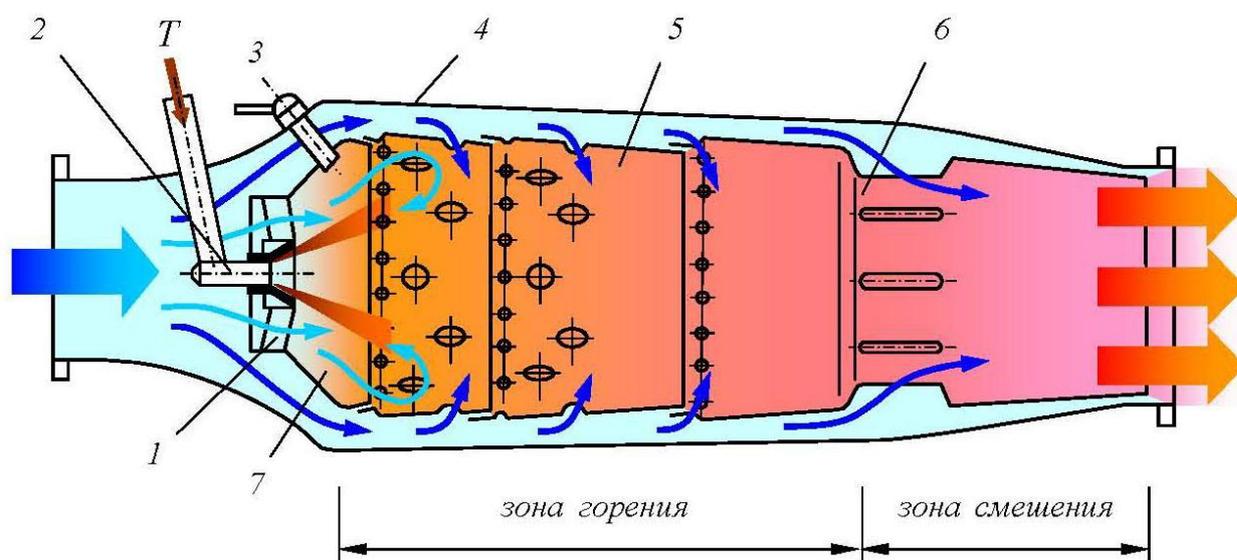


Рис. 6.10. Общий вид камеры сгорания: 1 – завихритель воздуха; 2 – форсунка для подачи топлива; 3 – воспламенитель; 4 – корпус камеры; 5 – жаровая труба; 6 – зона смешения холодного воздуха с горячими газами; 7 – зона смешения топлива с воздухом

Наибольшее распространение на транспорте и в промышленности получили только ГТУ открытого цикла.

На рис. 6.11 показано сечение сопла и решёток профилей рабочих и направляющих лопаток турбины. Рабочее колесо турбины вращается, а направляющее колесо неподвижно. На решётках в точках входа и выхода указаны планы (треугольники) скоростей, в которые входят окружная скорость U , относительная скорость W (касательная к поверхности лопатки), абсолютная скорость C , углы α и β между векторами скоростей C и W и линией, перпендикулярной оси вращения турбины.

Окружная скорость U остается неизменной, а величины относительной W , а вместе с ней абсолютной скорости C уменьшаются. В процессе обтекания криволинейных поверхностей рабочих лопаток поток газа изменяет направление движения и уменьшается по величине свою скорость. Согласно закону сохранения энергии снижение кинетической энергии переходит в потенциальную энергию давления. Давление, действуя на пло-

щадь лопатки, создает силу. Сила, умноженная на плечо (радиус вращения), создаёт крутящий момент, который приводит во вращательное движение колесо и вал турбины.

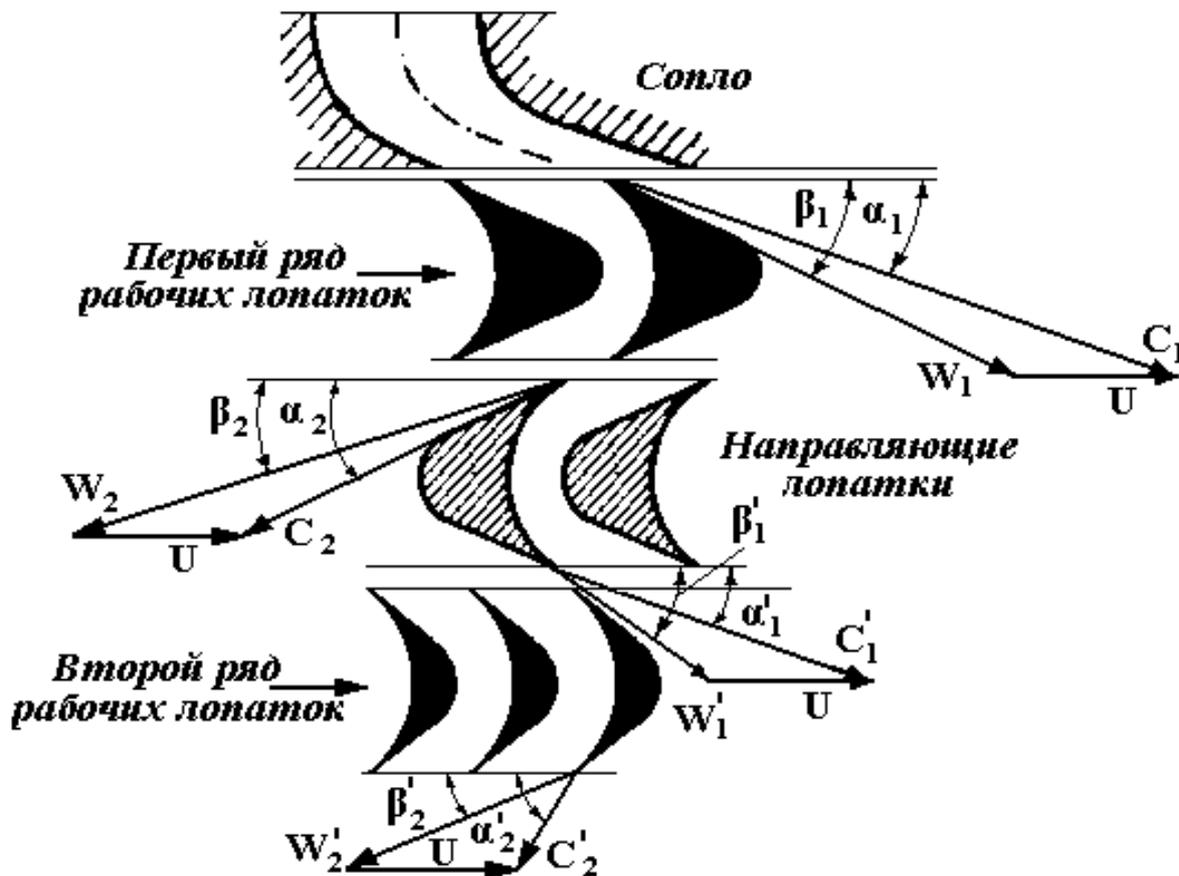


Рис. 6.11. Плоская решетка профилей и треугольники скоростей для рабочих и направляющих лопаток турбины: W – скорость касательная к поверхности лопатки (относительная скорость); U – окружная скорость; C – абсолютная скорость

Рабочий процесс простейшей ГТУ с одной ступенью компрессора и одной ступенью осевой турбины в координатах $p - V$ представлен на рис. 6.12.

Заштрихованная площадь вертикальными линиями $b34a$ численно равна работе расширения в газовой турбине (турбина вращает и компрессор). Линия $4-1$ в реальном процессе условно изображает замещение отработавших газов новой порцией рабочего тела. На участке $2-3$ теплота подводится, а на участке $4-1$ – отводится. Площадь, ограниченная линиями цикла 12341 , равна разности работ расширения в газовой турбине и сжатия в компрессоре, представляет собой полезную работу газотурбиной установки, которая используется для привода устройств (электрических генераторов, нагнетателей и других потребителей).

Для эффективной работы ГТД необходима высокая температура газов перед турбиной. Высокая температура газов перед турбиной затрудняет ее использование и обуславливает применение жаропрочных сталей и сплавов. Особенно тяжелы условия работы лопаток газовой турбины. Для понижения температуры лопаток и ротора их охлаждают. Вследствие этого может быть существенно повышена начальная температура газов перед турбиной (при тех же самых материалах), что приводит к значительному увеличению КПД ГТУ. Наибольшее распространение получило воздушное охлаждение продувкой сжатым воздухом специальных каналов.

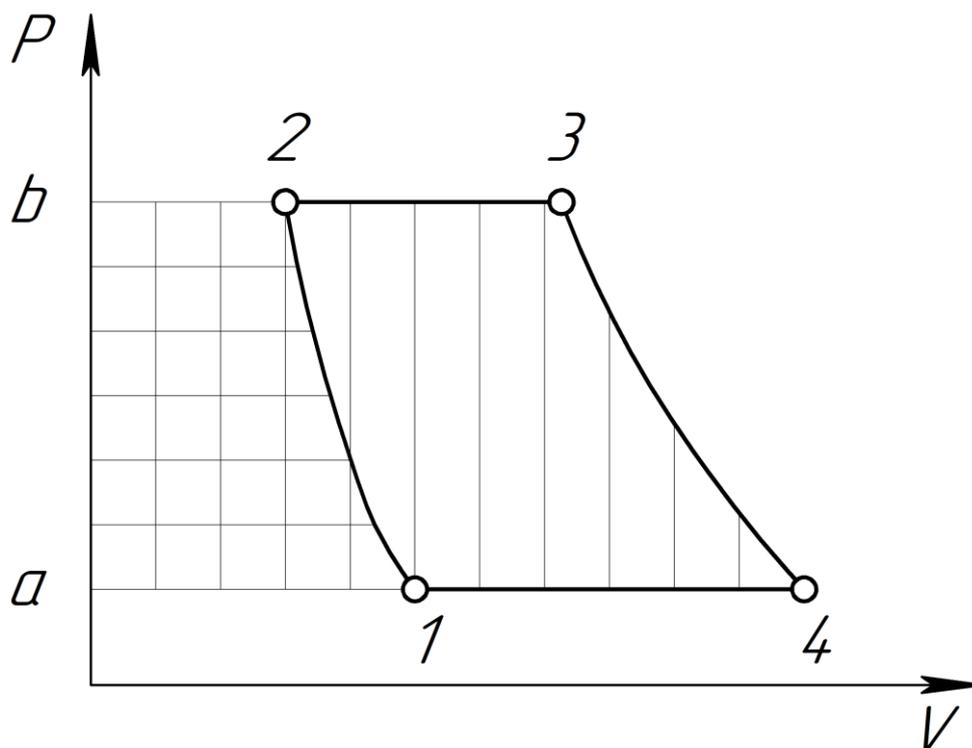


Рис. 6.12. Рабочий процесс (цикл) ГТУ в координатах $p - V$ (давление – объём):
 1–2 – процесс сжатия в компрессоре; 2 – 3 – процесс сгорания и
 подвод теплоты сгорания в КС; 3–4 – процесс расширения;
 4–1 – отвод теплоты

В ГТУ простейшей схемы отработавшие газы после расширения в турбине выбрасываются в атмосферу с высокой температурой, что является одной из причин низкой экономичности ГТУ. Часть теплоты уходящих газов можно использовать в теплообменных аппаратах-генераторах, в которых теплота передается сжатому компрессором воздуху.

Поверхность нагрева регенераторов образуют большое число труб малого диаметра или волнообразные пластины. По каналам между двумя волнистыми пластинами проходит нагреваемый воздух. С внешней стороны стенки этих каналов омываются отработавшими газами турбин.

ГТУ получили распространение в металлургической промышленности, на железнодорожном и автомобильном транспорте, в качестве судовых двигателей. Перспективно применение газовых турбин в качестве вспомогательных агрегатов (наддув) в поршневых и реактивных двигателях.

ГТД имеют ряд преимуществ перед поршневыми двигателями: рабочие органы совершают в них только вращательное движение и легко уравниваются; характеристика крутящего момента протекает весьма благоприятно (с уменьшением частоты вращения крутящий момент резко возрастает), что позволяет упростить конструкцию коробки передач; могут работать на любом малосернистом жидком или газообразном топливе с большим избытком воздуха, поэтому продукты сгорания их имеют меньшую концентрацию токсичных веществ; легко запускаются при низких температурах и отличаются большой габаритной мощностью.

Однако газовые турбины пока уступают по экономичности поршневым ДВС, особенно при работе с неполной нагрузкой, и отличаются большой тепловой напряженностью лопаток рабочего колеса, обусловленной их непрерывной работой в среде газов с высокой температурой. При снижении температуры газов, поступающих в турбину, для повышения надежности лопаток уменьшается мощность и ухудшается экономичность турбины. Без теплообменника ГТД имеют низкую экономичность, существующие теплообменники громоздки и сложны в изготовлении. Рабочая частота вращения вала тяговой турбины составляет 30 – 50 тыс. в минуту, что усложняет трансмиссию автомобиля. ГТД сложны и дороги в производстве.

Для осуществления высокоэффективного ГТД необходимо решить проблемы: металловедческую, связанную с изысканием жаропрочных сплавов, и аэродинамическую, заключающуюся в усовершенствовании проточных частей газовой турбины и осевого компрессора.

Повышение эффективности использования газотурбинного привода может осуществляться не только за счет повышения экономичности самого двигателя (повышение температуры газов перед турбиной, применение регенерации теплоты отходящих газов или использование других теплотехнических мероприятий), но и за счет широкой утилизации отходящих газов турбины. В частности, теплота отходящих газов ГТУ может быть эффективно использована на отопление помещений.

Применение жаростойких материалов и охлаждение лопаток, усовершенствование термодинамических схем ГТД позволяют улучшить их показатели и расширить область использования.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель и задачи работы.
3. Вычертить схему и дать описание принципа работы газотурбинной установки.
4. Дать описание принципа работы осевого компрессора. Построить план скоростей (по данным задания) на решётке профиля направляющего и рабочего колеса.
5. Изобразить схему камеры сгорания и пояснить принцип её работы.
6. Пояснить принцип работы осевой турбины и построить план скоростей (по данным задания) на решётке профиля направляющего и рабочего колеса.
7. Описать протекание рабочего цикла в координатах $P-V$ в одной ступени осевого компрессора и турбины.
8. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Поясните, как устроена одновальная газотурбинная установка простого цикла.
2. Как устроена и работает газотурбинная установка с приводным валом?
3. Как устроен и работает турбореактивный двигатель и как определяется его тяга?
4. Поясните принцип работы осевого компрессора и постройте план скоростей на решётке профиля направляющего и рабочего колеса.
5. Для какой цели служат направляющие лопатки, они вращаются или нет?
6. Как определяется величина и направление окружной, относительной и абсолютной скоростей в осевой турбине?
7. Как устроена камера сгорания ГТУ и как организован в ней процесс сгорания керосина?
8. Поясните принцип работы осевой турбины. Как построить план скоростей на решётке профиля направляющего и рабочего колеса?
9. Для какой цели сужают или расширяют межлопаточные каналы, а иногда оставляют их постоянного сечения в направляющем аппарате или рабочем колесе?
10. Укажите область применения ГТУ, их преимущества и недостатки по сравнению с поршневыми ДВС.

Практическая работа № 7

ПАРОВАЯ МАШИНА

7.1. Цели и задачи практической работы

Цели практической работы: формирование и закрепление знаний по разделу «Паровые машины».

Задачи: изучить устройство, принцип действия и основы расчета паровой машины (двигателя).

7.2. Устройство и принцип действия паровой машины

На рис. 7.1. изображена схема паросиловой установки, включающая паровой котел 1, пароперегреватель 2, паровую машину (поршневую или турбину) 3, конденсатор 4 и насос 5.

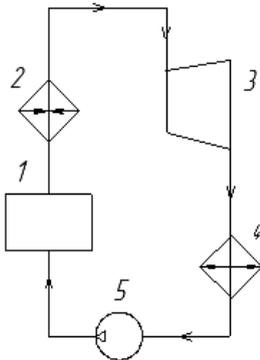


Рис. 7.1. Схема паросиловой установки: 1 – паровой котел; 2 – пароперегреватель; 3 – двигатель; 4 – конденсатор; 5 – насос

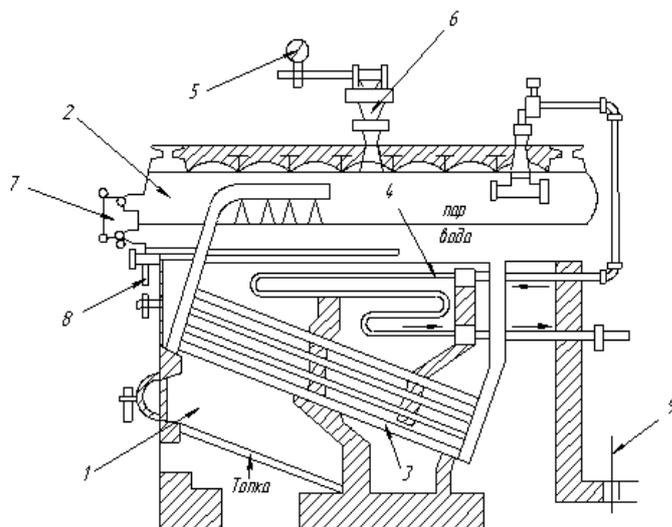


Рис. 7.2. Схема устройства водотрубного котла: 1 – топка; 2 – котел; 4 – пароперегреватель; 5 – манометр; 6 – клапан предохранительный; 7 – водомерное стекло; 8 – труба подвода воды в котел; 9 – заслонка дымохода

В паровом котле происходят одновременно следующие процессы: горение топлива; передача воде тепла через стенки; получение водяного пара и его перегрев; тяга топочных газов, которые отводятся в атмосферу.

Паровой котел состоит из топки и собственно котла (рис. 7.2). Уголь или дрова сжигаются в топке 1 на колосниковых решетках. Жидкое топливо сжигается в распыленном состоянии.

Котел 2 состоит из металлической емкости и вваренных в неё труб 3, через стенки которых теплота от горючих газов передается воде. На котле имеется манометр 5 за наблюдением пара и предохранительный клапан 6, выпускающий пар, если давление превысит допустимую величину. В котле имеется прибор 7 для контроля уровня воды.

Из котла пар поступает в поршневую машину, где его теплота преобразуется в механическую работу. Поршневая машина (рис. 7.3.) состоит из цилиндра 1, поршня 2, распределительного механизма (золотника) 3 и кривошипно-шатунного механизма, включающего ползун 4, шатун 5 и кривошип 6. При помощи золотника пар направляется в левую или правую полость цилиндра и, действуя на площадь поршня, создает силу, приводящую во вращение колесо машины.

Основным недостатком поршневой паровой машины является ее низкая экономичность. Коэффициент полезного действия лучших образцов стационарных и судовых машин не превышает 25%, а паровозных – 10%. Причиной низкого КПД является применение пара с малым давлением протекания цикла (до 2 МПа) и температурой 320 – 350 °С. Производство паровых машин в России было прекращено в 1957 году.

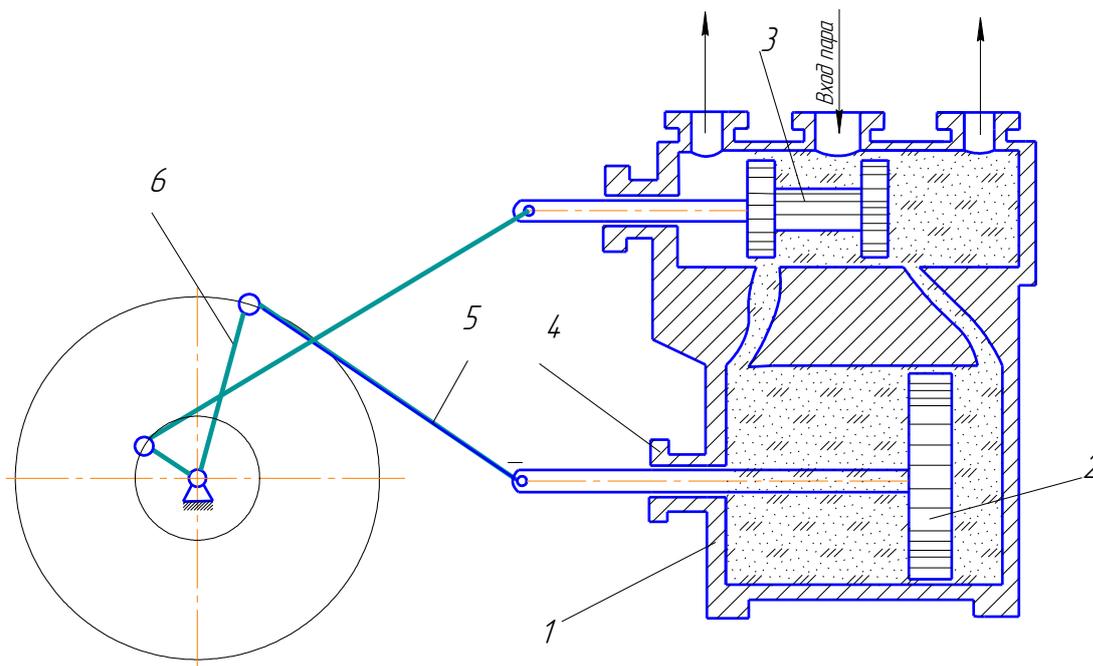


Рис. 7.3. Схема паровой поршневой машины:
1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – золотник; 4 – ползун; 5 – шатун;
6 – кривошип

На рис. 7.4 и 7.5 показано устройство парового двигателя и внешний вид первого паровоза.

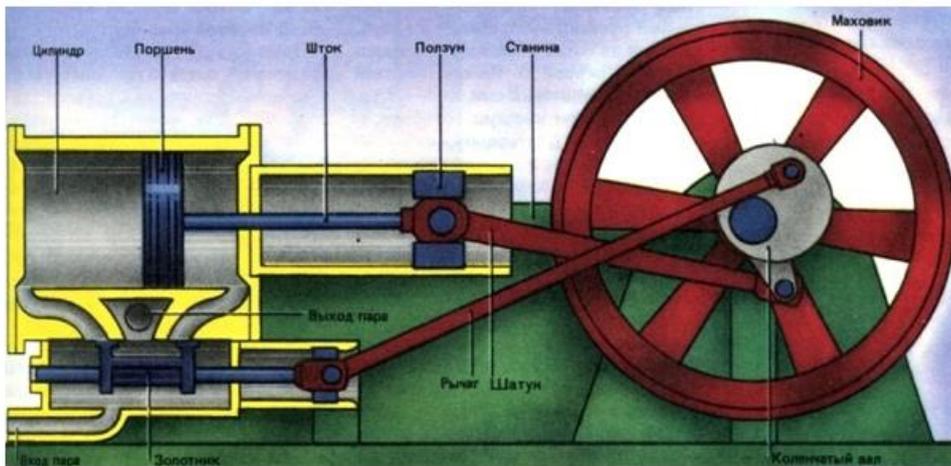


Рис. 7.4. Устройство парового двигателя

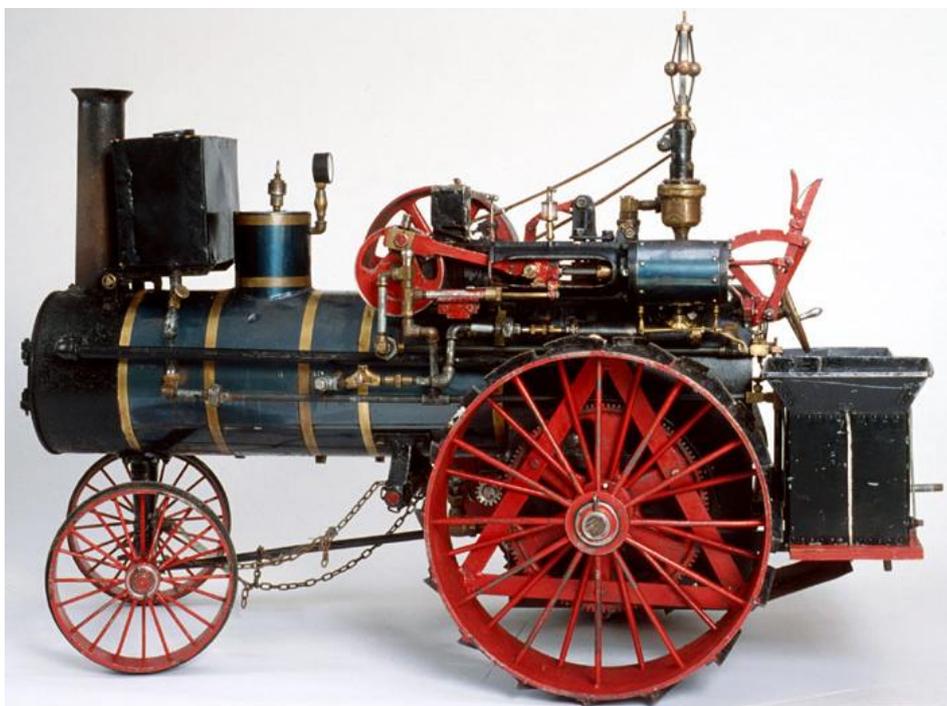


Рис. 7.5. Внешний вид первого паровоза

7.3. Основы расчета двигателя паровой машины

Исходные данные:

- давление пара P на входе в золотник (распределитель) $10 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ (10 атм);
- диаметр поршня $D = 0,3 \text{ м}$, ползуна $0,05 \text{ м}$;
- ход поршня $L = 1 \text{ м}$;
- радиус кривошипа $R = 0,5 \text{ м}$;
- диаметр колеса $D_k = 1,2 \text{ м}$;
- частота вращения колеса, контактирующего с рельсом, 300 мин^{-1} .

1. Определим площадь поршня по формуле

$$S = \pi \cdot D^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,3^2 / 4 = 0,07 \text{ м}^2 . \quad (7.1)$$

2. Определим силу, действующую на поршень со стороны давления пара,

$$F = S \cdot P = 0,07 \cdot 10 \cdot 10^5 = 70000 \text{ Н}. \quad (7.2)$$

3. Крутящий момент, возникающий на колесе,

$$M = F \cdot R = 70000 \cdot 0,5 = 35000 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (7.3)$$

4. Работа, совершающая за 1 ход поршня,

$$A = F \cdot L = 70000 \cdot 1 = 70000 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (7.4)$$

За 1 оборот колеса поршень совершает 2 хода и работа пара составит 140000 Н·м (Дж).

5. Частота вращения колеса равна 300 мин⁻¹ или 5 оборотов в с. Один оборот совершается за 0,2 с.

6. Мощность паровой машины составит

$$N = A / t = 140000 / 0,2 = 700\,000 \text{ Вт} = 700 \text{ кВт}. \quad (7.5)$$

7. За 1 минуту паровоз пройдет путь

$$L = \pi \cdot D_k \cdot n = 3,14 \cdot 1,2 \cdot 300 = 1130 \text{ м}. \quad (7.6)$$

За час паровоз пройдет путь $1130 \cdot 60 = 67800 \text{ м}$ или 67,8 км.

Содержание отчета

- 1. Название работы.*
- 2. Цель и задачи работы.*
- 3. Схема паровой машины (рис. 7.3) с описанием принципа работы.*
- 4. Привести результаты расчета паровой машины по данным задания.*
- 5. Указать преимущества и недостатки парового двигателя.*
- 6. Выводы по работе.*

Контрольные вопросы и задания

- 1. Поясните принцип работы паровой машины.*
- 2. Что используют в качестве рабочего тела в паровой машине?*
- 3. Для чего предназначен рабочий поршень в паровой машине?*
- 4. Укажите последовательность протекания цикла в поршневой машине.*
- 5. Укажите преимущества и недостатки паровой машины.*
- 6. Поясните последовательность расчета паровой машины.*

Практическая работа № 8

ДВИГАТЕЛИ ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ

8.1. Цели и задачи практической работы

Цели практической работы: формирование и закрепление знаний по разделу «Двигатели внешнего сгорания».

Задачи: изучить устройство, принцип действия и основы расчета двигателя внешнего сгорания.

Принцип действия двигателя внешнего сгорания разработал и запатентовал в 1816 г. шотландский священник *Роберт Стирлинг*, в честь которого он и называется. Практическая реализация такого двигателя была осуществлена только в середине 20-х годов прошлого века, а всесторонние исследования и совершенствование конструкции далеки еще от завершения и в наши дни. Некоторые технологические особенности и используемые материалы не позволяют пока широко применять двигатель Стирлинга в качестве транспортной силовой установки, хотя уже достигнуты хорошие результаты и налажено широкое его применение для привода систем на космических объектах и в стационарных силовых агрегатах специального назначения.

Машина Стирлинга представляет устройство с замкнутым термодинамическим регенеративным циклом, с внешним подводом теплоты. Цикл состоит из процессов *сжатия, нагревания, расширения (рабочего хода) и охлаждения*. Под циклом понимают совокупность процессов, возвращающих систему в исходное состояние. Рабочим телом может служить воздух, однако лучше гелий или водород, которые имеют более высокие коэффициенты теплопередачи и обеспечивают течение газа с меньшими гидравлическими сопротивлениями. Поток рабочего тела управляют путём изменения его объёма, температуры и давления. На этом принципе основано превращение теплоты в работу.

8.2. Идеальный цикл Стирлинга

В цилиндре расположены два поршня, с размещенным между ними регенератором. *Регенератор* – теплообменник или термодинамическая «губка», способная поглощать и отдавать теплоту. Обычно он состоит из пучка тонких медных проволок [7]. Регенератор поглощает и отдает рабочему телу только часть теплоты. Основную порцию теплоты рабочее тело получает от нагретого цилиндра в процессе расширения.

В машине Стирлинга имеются две полости с периодически изменяющимися объемами, которые находятся при различных температурных уровнях, соединяются посредством регенератора и вспомогательных теплообменников.

Один из объёмов, расположенный между регенератором и поршнем, представляет полость сжатия, охлаждаемую, например, оребрённой поверхностью цилиндра до температуры T_{\min} . Данный поршень назовем **вытеснителем**. Другой объём представляет полость расширения, находящуюся при высокой температуре T_{\max} , к которой постоянно подводится теплота. Поршень, расположенный в данной полости, назовем **рабочим**.

Рассмотрим цикл двигателя Стирлинга (рис. 8.1). За исходное примем положение поршня-вытеснителя I, находящегося в нижней мертвой точке (НМТ). Рабочий поршень II находится около регенератора и является в данный момент времени неподвижным. Полость сжатия охлаждается, а к цилиндру полости расширения подводится теплота q , например, от горелки. Для пояснения протекания цикла Стирлинга цифрами 1, 2, 3, 4 обозначим положение поршня-вытеснителя I и рабочего поршня II в цилиндре.

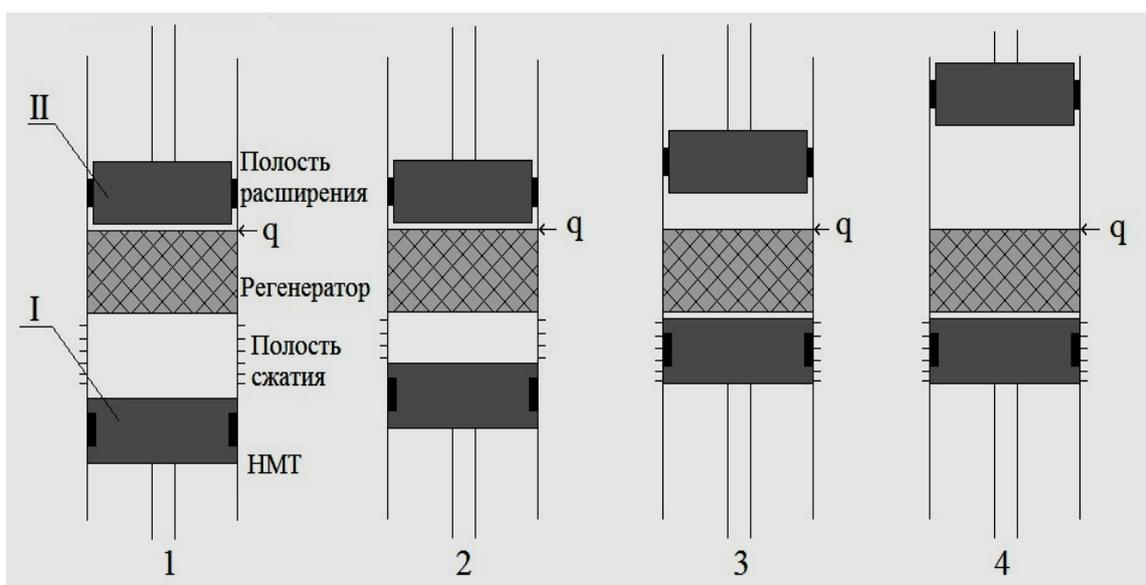


Рис. 8.1. Принцип работы двигателя Стирлинга

В начале цикла, например, температура рабочего тела равнялась 350 К, после прохождения регенератора – 400 К, а в полости расширения достигла 1000 К. На рис. 8.2 показаны в координатах $P - v$ (давление – удельный объём) и $T - S$ (температура – энтропия) диаграммы изменения давления и температуры в полостях сжатия и расширения.

Энтропия (от греч. – поворот, превращение) – функция состояния термодинамической системы, характеризующая направление протекания процесса между системой и внешней средой.

Сжатие (линия 1 - 2). Поршень - вытеснитель движется вверх, а рабочий неподвижен. Давление повышается, а температура остаётся постоянной, так как полость сжатия охлаждается (процесс изотермический). При изотермическом сжатии затрачивается наименьшая работа для создания давления, необходимого для проталкивания рабочего тела через регенератор.

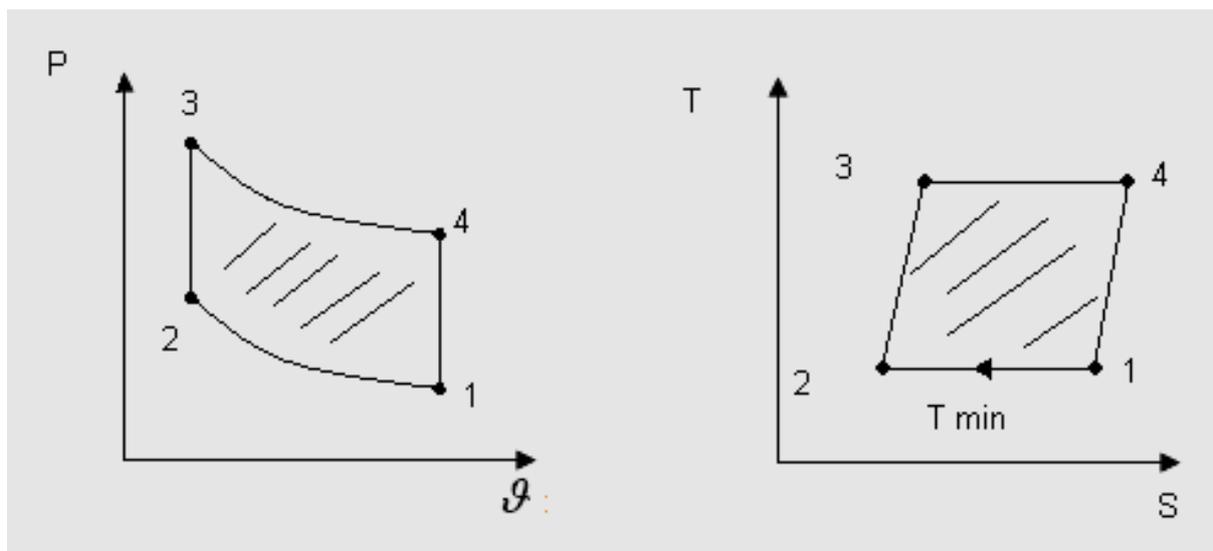


Рис. 8.2. Диаграммы двигателя Стирлинга в координатах $P - \varphi$ и $T - S$

Нагревание (линия 2 – 3). Оба поршня движутся одновременно, объём между ними остаётся постоянным (процесс изохорический). Проходя через регенератор, нагретый от предыдущего цикла воздух (рабочее тело) нагревается и температура T , давление P повышаются.

Расширение (линия 3 – 4). Поршень - вытеснитель I неподвижен, а рабочий поршень II поднимается вверх, совершая работу. Через стенку цилиндра от внешнего источника (горелки) подводится теплота. При увеличении объёма полости расширения давление падает. Температура рабочего тела достигает максимального значения и остаётся неизменной (теплота постоянно подводится).

Охлаждение (линия 4 - 1). Оба поршня движутся вниз. Объём между ними остаётся неизменным. Рабочее тело из полости расширения перемещается в полость сжатия. Проходя через регенератор, рабочее тело охлаждается от T_{\max} до T_{\min} , отдавая теплоту регенератору, которая будет передана рабочему телу в процессе 2 – 3 следующего цикла. Площади диа-

грамм в координатах P - g и T - S представляют собой работу за цикл (см. рис. 8.2). В координатах P - g и T - S цикл состоит из двух изотерм и двух изохор.

В действительности не удастся осуществить в точности указанный цикл, и индикаторная диаграмма имеет вид эллипса.

8.3. Принцип действия двигателя Стирлинга

Обычно двигатели Стирлинга подразделяют на два основных вида.

Бета-Стирлинг (рис. 8.3) – цилиндр всего один, горячий с одного конца и холодный с другого. Внутри цилиндра движутся поршень (с которого снимается мощность) и вытеснитель, разделяющий горячую и холодную полости. Газ перекачивается из холодной части цилиндра в горячую через регенератор. Регенератор может быть внешним как часть теплообменника или может быть совмещён с поршнем-вытеснителем.

Альфа-Стирлинг (рис. 8.4) – содержит два отдельных силовых поршня в отдельных цилиндрах: один – горячий, другой – холодный. Цилиндр с горячим поршнем находится в теплообменнике с более высокой температурой, с холодным – в более холодном. У данного вида двигателя отношение мощности к объёму достаточно велико, но, к сожалению, высокая температура «горячего» поршня создаёт определённые технические трудности. Регенератор находится между горячей частью соединительной трубки и холодной.

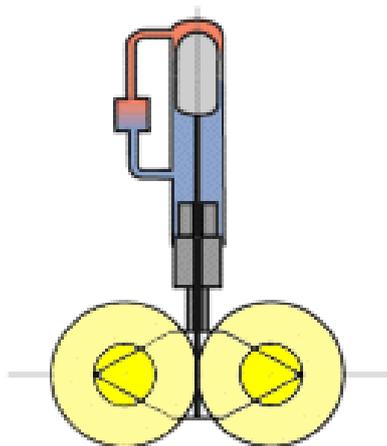


Рис. 8.3. Бета-Стирлинг с ромбическим механизмом и регенератором

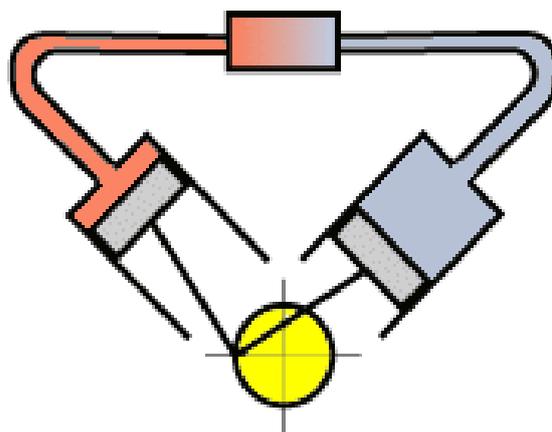


Рис. 8.4. Альфа-Стирлинг

Рассмотрим принцип действия одноцилиндрового двигателя Бета-Стирлинг, который имеет ромбический механизм привода, с двумя поршнями и регенератором (рис. 8.5).

Двигатель состоит из цилиндра 13, в котором совершают возвратно-поступательное движение два поршня, условно называемые **вытеснителем 1** и **рабочим 2**. Взаимное перемещение поршней и передача крутящего момента на кривошипные валы 9 осуществляются с помощью **ромбовидного шатунного механизма 10** и штока 12, поршня-вытеснителя и штока 11 рабочего поршня.

Рабочее тело находится в полости *A* между верхним рабочим поршнем и головкой цилиндра и в полости *B* между поршнями, а в процессе перемещения поршней оно проходит холодильник 3, регенератор 4 и теплообменник-нагреватель 6, где воспринимает теплоту продуктов сгорания топлива, подаваемого в зону горения форсункой 5. Отходящие газы 8 подогревают воздух, подводимый по каналу 7 к горелке.

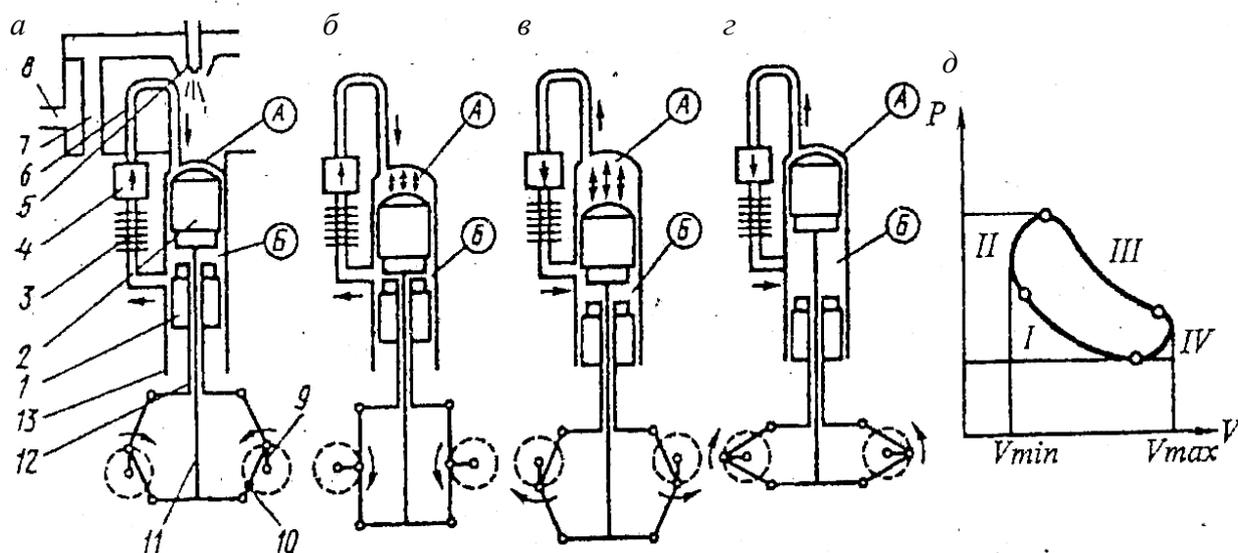


Рис. 8.5. Принцип действия двигателя Стирлинга:

a, б, в, г – такты двигателя; *д* – индикаторная диаграмма; I – сжатие (*a–б* в полости B); II – подвод теплоты из регенератора; III – расширение (*б–в* в полости A; *в–г* в полости B); IV – отвод теплоты

В положении (рис. 8.5, *a*) рабочий поршень 2 подходит к ВМТ, а поршень-вытеснитель 1 **сжимает рабочее тело** в полости B (процесс изображен на нижней ветви I индикаторной диаграммы, рис. 8.5, *д*), откуда оно поступает через холодильник в регенератор и к нагревателю (ветвь II). В **регенераторе** рабочее тело частично нагревается, используя для этого оставшуюся теплоту от предыдущего рабочего цикла. При повороте криво-

шипов вала в направлении стрелок поршни взаимно сближаются (рис. 8.5, б) и объём полости *B* дополнительно уменьшается, но к тому времени происходит уже **рабочий ход** – расширение нагретого рабочего тела в полости *A* (верхняя ветвь III индикаторной диаграммы). При дальнейшем повороте кривошипов (рис. 8.5, в) **завершается расширение** в полости *A* и начинается расширение в полости *B*, куда и устремляется рабочее тело, проходя через **регенератор 4** и отдавая ему свою теплоту. Для **охлаждения** рабочее тело поступает в холодильник 3 (ветвь IV). В положении (рис. 8.5, г) объём рабочего тела максимальный. При дальнейшем повороте кривошипов верхний поршень завершает движение к ВМТ, а нижний поршень начинает **ход сжатия**.

Схема двигателя Стирлинга, изображенная на рис. 8.5, конструктивно сложна, так как нуждается в ромбическом механизме и штоках, приводящих в движение рабочий поршень и поршень-вытеснитель. Более простую модель двигателя Стирлинга можно выполнить, используя кривошипно-шатунный механизм с ползуном и штоком, приводящим в движение рабочий поршень и поршень-вытеснитель.

На рис. 8.6 показана более простая действующая модель двигателя Стирлинга [7]. При создании модели использовались схемы и разрезы двигателя, предложенные инженером Скурьятом Эрнестом Никодимовичем.

Рабочий поршень 2 движется в цилиндре 1. Он соединён с кривошипно-шатунным механизмом 15, который имеет маховик 14. Маховик служит для равномерного вращения коленчатого вала и запуска двигателя. Поршень - вытеснитель 10 располагается в цилиндре 9 с зазором, что обеспечивает движение воздуха из холодной полости V_X в горячую V_T и наоборот. Цилиндр 9, где движется поршень - вытеснитель 10, включает в себя холодильник 6 (радиатор), регенератор 7 (катушка из медной проволоки). Поршень - вытеснитель 10 имеет шток, который уплотнён при помощи сальника 5. При движении поршня - вытеснителя 10 объём воздуха в цилиндре остается постоянным, только он вытесняется из одной полости в другую. При нагревании данного объёма воздуха давление повышается, а при охлаждении – понижается. Способность модели повышать и понижать давление в замкнутом пространстве легла в основу работы двигателя Стирлинга.

При помощи горелки 11 правая часть цилиндра 9 нагревается до температуры 500 – 600 К. При движении поршня - вытеснителя 10 вправо (к ВМТ) холодный воздух, проходя через зазоры между поршнем-вытеснителем 10 и горячим цилиндром 9, нагревается. Температура и давление повышаются, и избыточное давление передаётся через трубопровод 3 и действует на площадь рабочего поршня 2.

Рабочий поршень за один оборот коленчатого вала совершает два хода (такта), производя расширение (рабочий ход) и сжатие (двухтактный цикл). Поршень - вытеснитель находится в нейтральном положении, когда рабочий поршень 2 находится в ВМТ или НМТ. Отсчет движения поршня - вытеснителя 10 приемем от положения рабочего поршня 2 в НМТ (начало сжатия рабочего тела).

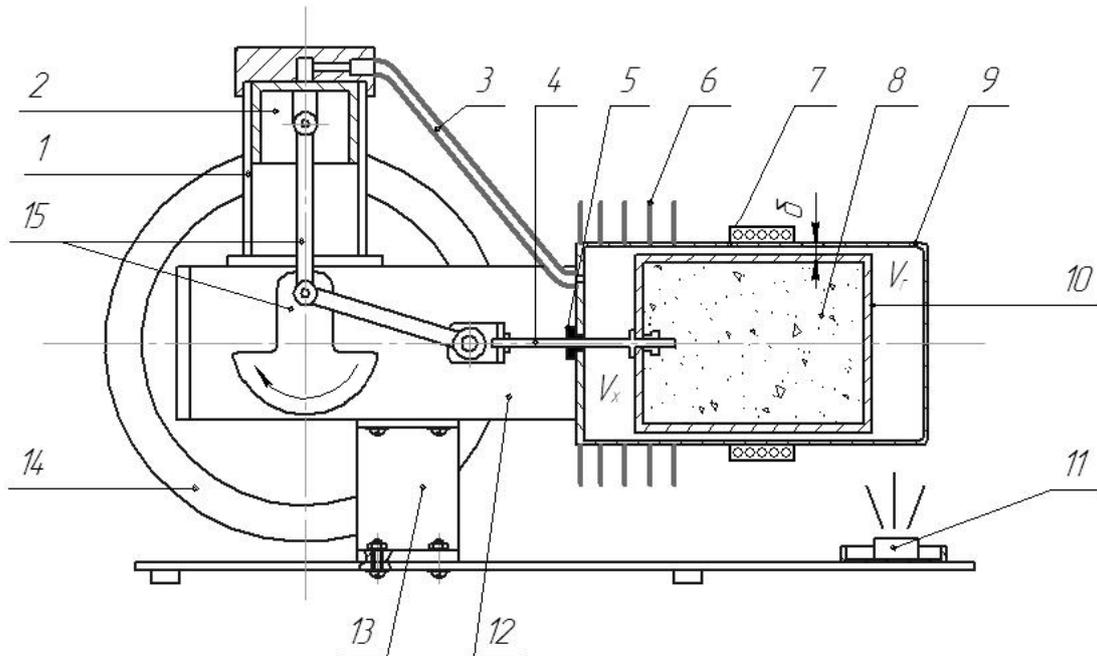


Рис. 8.6. Двигатель Стирлинга (действующая модель):
 1 – рабочий цилиндр; 2 – рабочий поршень; 3 – трубопровод; 4 – шок;
 5 – втулка сальника; 6 – радиатор (холодильник); 7 – регенератор;
 8 – стекловата; 9 – цилиндр; 10 – поршень-вытеснитель; 11 – горелка;
 12 – рама; 13 – подставка; 14 – маховик; 15 – кривошипно-шатунный механизм; V_r – горячая полость; V_x – холодная полость

При повороте коленчатого вала от 0 до 90° рабочий поршень 2 совершает **процесс сжатия**, двигаясь к ВМТ, а поршень-вытеснитель 10 от своего нейтрального положения движется влево, проталкивая теплый воздух через кольцевой зазор и **охлаждая** его при помощи холодильника 6. При вращении коленчатого вала от 90 до 180° рабочий поршень продолжает изотермическое сжатие, а поршень- вытеснитель 10 движется вправо к нейтральному положению. После охлаждения рабочего тела начинается его **нагрев** от регенератора (средняя часть цилиндра). При повороте вала от 180 до 270° поршень-вытеснитель 10 от своего нейтрального положения движется вправо, проталкивая холодный воздух через кольцевой зазор и нагревая его от горячей стенки цилиндра. Рабочий поршень 2 начинает движение под действием создаваемого давления от ВМТ к НМТ (**процесс**

расширения). При вращении вала от 270 до 360° поршень-вытеснитель 10 возвращается в свое нейтральное положение (движется влево). Регенератор забирает часть теплоты рабочего тела, **охлаждая** его. Цикл завершается и включает в себя процессы **сжатия, нагревания, расширения, охлаждения**.

При нагретом цилиндре и вращении маховика 14 двигатель запускается.

Действующая модель имеет диаметр рабочего поршня 40 мм, поршня-вытеснителя – 60 мм, радиус кривошипа – 15 мм, зазор между цилиндром и поршнем-вытеснителем – 1 мм. Общий максимальный объем рабочего цилиндра и цилиндра с поршнем - вытеснителем составляет 180 см³. При сжатии воздуха в рабочем цилиндре объем рабочего тела уменьшается до 140 см³. Этот объем при перемещении поршня-вытеснителя остается постоянным, только в нем меняются температура и давление. При частоте вращения вала двигателя 500 мин⁻¹ и радиусе кривошипа 0,015 м средняя скорость движения поршня – вытеснителя составляет 0,5 м/с. Средняя скорость воздуха в кольцевом радиальном зазоре, равном 1 мм, определяется из уравнения постоянства расходов и составляет 8 м/с. При прохождении вытеснителем пути, равного ходу поршня, вытесняется объем, равный 85 см³. Этот объем вытесняется при движении поршня-вытеснителя к НМТ (охлаждение) и ВМТ (нагрев). При длине цилиндра 10 см и высоте поршня 5 см объем воздуха в цилиндре составляет 140 см³. Поршень-вытеснитель выполнен из изоляционного материала, заполненного стекловатой, с коэффициентом теплопроводности 0,04 Вт/(м·К).

Поршень-вытеснитель повышает и снижает давление (за счет изменения температуры) в замкнутом пространстве. Рабочий поршень воспринимает изменяемое давление и совершает работу.

Эффективную мощность (кВт) можно определить из выражения

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_h \cdot n}{60}, \quad (8.1)$$

где P_e – среднее эффективное давление в рабочем цилиндре, МПа; V_h – рабочий объем цилиндра, л; n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

Крутящий момент на валу двигателя (Н·м) определяется по формуле

$$M = \frac{9550 \cdot N_e}{n}. \quad (8.2)$$

При крутящем моменте на валу двигателя, равном 0,3 Н·м, и частоте вращения вала 500 мин⁻¹ двигатель развивает эффективную мощность 16 Вт.

Данная мощность двигателя обеспечивается при рабочем объеме цилиндра в 40 см^3 и среднем избыточном давлении в цилиндре $0,05 \text{ МПа}$ ($0,5 \text{ атм}$).

Если принять, что в данной модели до 60% теплоты сгоревшего топлива теряется в окружающую среду, а индикаторный КПД примем равным 20% , механический – 60% , то эффективный КПД установки будет равен 12% .

Представленная модель двигателя Стирлинга имеет низкий КПД, но обладает простой конструкцией и наглядно демонстрирует преобразование тепловой энергии в механическую работу.

Для повышения КПД модели рекомендуется изменение угла между цилиндрами или кривошипами, разные размеры радиусов кривошипов для привода рабочего поршня и поршня - вытеснителя и снижение потерь теплоты в окружающую среду путем применения керамики или изоляционных материалов.

На рис. 8.7 показана схема нагрева газа (воздуха) и его охлаждение при движении поршня - вытеснителя вправо и влево. Правая часть цилиндра нагревается, а левая – охлаждается. При движении поршня вправо воздух принудительно проталкивается через кольцевой зазор между поршнем и горячей частью цилиндра и нагревается, например, до 500 К . Температура и давление воздуха в замкнутом объеме повышаются. При движении поршня влево горячий воздух проталкивается через зазоры, расположенные в зоне холодильника (оребрённая поверхность), температура снижается, например, до 350 К и давление падает, что обеспечивает приход системы в первоначальное состояние.

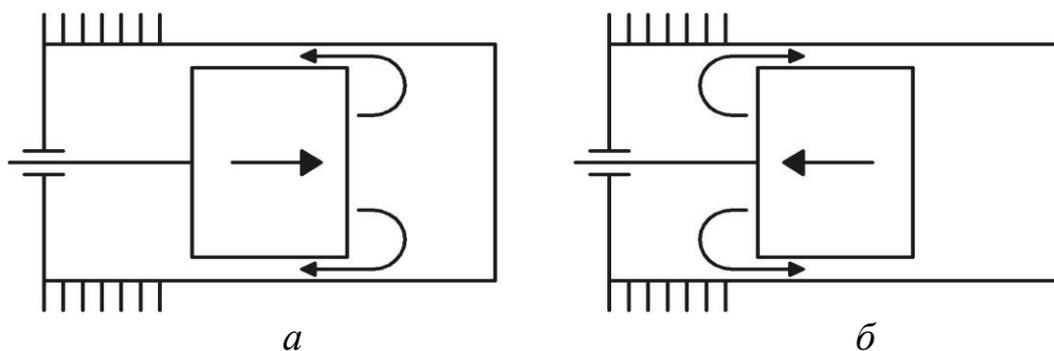


Рис. 8.7. Движение воздуха в кольцевом зазоре между поршнем - вытеснителем и цилиндром:
а – нагрев воздуха; *б* – охлаждение воздуха

Известны два способа передачи энергии – в форме работы и теплообмена. Двигатель Стирлинга можно представить в виде двух механизмов –

преобразователя давления в работу и преобразователя энергии топлива в температуру рабочего тела, которая принудительно повышается и понижается.

Для интенсификации теплопередачи воздух проталкивается через зазор между поршнем и цилиндром. Примерный расчет теплообмена в каналах действующей модели двигателя Стирлинга приводится ниже.

Следует отметить, что если студент (бакалавр) первого курса еще не изучал специальные материалы по теплотехнике и теплопередаче, то даже расчет простейшей модели двигателя Стирлинга ему будет непонятен. Для понятия представленного материала студенты на старших курсах будут изучать такие дисциплины, как физику, математику, теплотехнику, гидравлику, теорию рабочих процессов.

Теплопередача между горячим и холодным воздухом сквозь разделяющую их твердую стенку определяется из выражения [7]

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T, \quad (8.3)$$

где Φ – тепловой поток, Вт (Дж/с); k – коэффициент **теплопередачи**, Вт/(м²·К); A – площадь охлаждения, м²; ΔT – средний температурный напор, К.

Для цилиндра толщиной 5 мм, выполненного из стали 15, с **теплопроводностью** 50 Вт/(м²·К) и охлаждением рабочего тела воздухом коэффициент теплопередачи равен 80 Вт/(м²·К). При охлаждаемой поверхности цилиндра в 47 см² и среднем температурном напоре 160 К тепловой поток равен 60 Вт. Увеличение поверхности цилиндра в 15 раз за счет применения ребер тепловой поток увеличился в 11 раз, что позволило охладить рабочее тело на 50 °С.

Для определения передачи тепла от горячей стенки к рабочему телу (воздуху) вначале находим режим течения воздуха (ламинарный или турбулентный) по формуле

$$\text{Re} = \frac{\varrho \cdot d_{\text{э}}}{\nu}, \quad (8.4)$$

где ϱ – средняя скорость воздуха (м/с) в зазоре между поршнем – вытеснителем и цилиндром; эквивалентный диаметр кольцевого зазора $d_{\text{э}} = d_{\text{ц}} - d_{\text{п}}$, м; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с, при средней температуре 100 °С.

$$\text{Re} = \frac{8 \cdot 0,002}{23,14 \cdot 10^{-6}} \approx 690 .$$

Следовательно, движение в пограничном слое ламинарное ($\text{Re} < 10^5$).

Для определения коэффициента **теплоотдачи** от нагретой стенки цилиндра к воздуху найдем критерий Нуссельта по формуле

$$Nu = 0,67 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}, \quad (8.5)$$

где Pr – критерий Прандтля, для воздуха он равен 0,7 и характеризует соотношение между полями скоростей и температур.

$$Nu = 0,67 \cdot 690^{0,5} \cdot 0,7^{0,33} \approx 15.$$

Коэффициент теплоотдачи определяют из выражения

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_3}, \quad (8.6)$$

где λ – коэффициент **теплопроводности** воздуха, Вт/(м·К),

$$\alpha = \frac{15 \cdot 0,0321}{0,002} \approx 240 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тепловой поток, переданный горячим цилиндром рабочему телу, находится по формуле

$$\Phi = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \quad (8.7)$$

где F – площадь нагрева цилиндра, м², при прохождении воздуха в кольцевом зазоре; Δt – средний температурный напор в кольцевом зазоре при входе и выходе из него.

$$\Phi = 240 \cdot 0,0084 \cdot 50 \approx 100 \text{ Вт}.$$

С увеличением зазора между цилиндром и поршнем-вытеснителем уменьшаются коэффициент теплоотдачи и переданное количество теплоты рабочему телу.

Средний температурный напор определен из условия, что температура гильзы постоянная, например, 200 °С. Воздух входит в кольцевой зазор (щель) при температуре 50 °С, на выходе приобретает температуру, примерно равную температуре поверхности гильзы.

Двигатель Стирлинга представляет изолированную систему, не имеющую обмена с окружающей средой, которую он не загрязняет. Процесс сгорания топлива не зависит от времени (как у двигателей внутреннего сгорания), и его можно организовать с минимальным выбросом вредных веществ. При использовании энергии Солнца двигатель Стирлинга представляет механизм, не загрязняющий атмосферу. Главное преимущество двигателя Стирлинга в том, что он не имеет токсичного выхлопа газов и может работать на любом виде топлива.

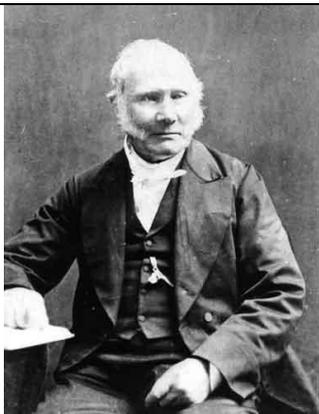
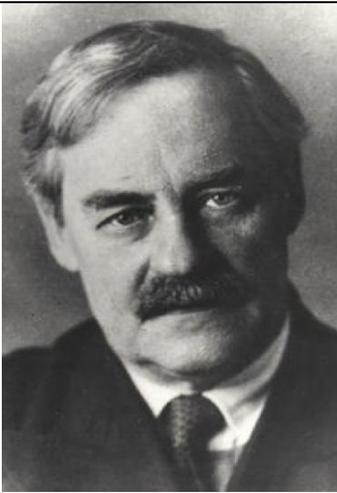
Содержание отчета

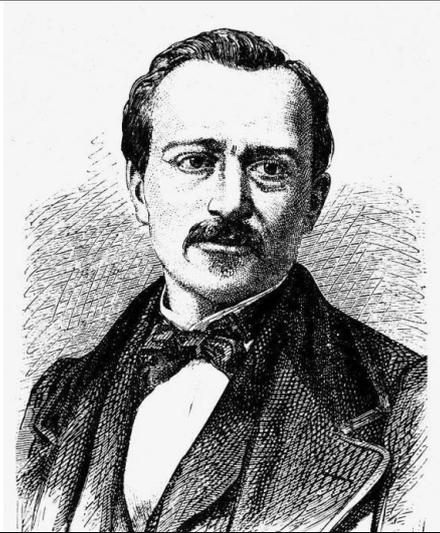
1. Название работы.
2. Цель и задачи работы.
3. Поясните принцип работы двигателя Стирлинга из анализа рис. 8.1.
4. Вычертите схему и дайте описание принципа работы двигателя Стирлинга (действующая модель, рис. 8.6).
5. Вычертите схему и дайте описание нагрева и охлаждения воздуха при движении поршня-вытеснителя в цилиндре двигателя Стирлинга (рис. 8.7).
6. Укажите преимущества и недостатки двигателя Стирлинга.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Поясните принцип работы двигателя внешнего сгорания.
2. Какой газ используется в качестве рабочего тела в двигателях внешнего сгорания?
3. Для чего предназначен рабочий поршень и поршень – вытеснитель в двигателе внешнего сгорания?
4. Укажите последовательность протекания цикла двигателя Стирлинга.
5. Укажите преимущества и недостатки двигателя Стирлинга.
6. Расскажите принцип работы действующей модели Стирлинга.
7. Как рассчитывается теплообмен в каналах двигателя Стирлинга?

Приложение
(справочное)
Пионеры двигателестроения

	
<p style="text-align: center;">Ползунов Иван Иванович (1728 – 1766)</p>	<p style="text-align: center;">Роберт Стирлинг (1790 – 1878)</p>
	
<p style="text-align: center;">Даймлер Готлиб (1834 – 1900)</p>	<p style="text-align: center;">Тринклер Густав Васильевич (1876 – 1957)</p>
	
<p style="text-align: center;">Рудольф Дизель (1858 – 1913)</p>	<p style="text-align: center;">Мазинг Евгений Карлович (1880–1944)</p>



Ленуар Жан Этьен (1822 – 1900)



Николаус Отто (1832 – 1891)



Гринивецкий Василий
Игнатьевич (1871 – 1919)



Костович Огнеслав Степанович
(1851 – 1916)



Джеймс Уатт (1736 – 1819)



Орлин Андрей Сергеевич (1902 – 1988)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние интенсивности процесса впрыска на баллистику топливного факела / Ю.П. Макушев, А.В. Филатов // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». – 2013. – №2 (120). – С. 107 – 111.
2. Макушев, Ю.П. Методика расчета, диагностирования и регулирования системы перепуска газа агрегата наддува двигателя / Ю.П. Макушев, А.В. Дрель, Т.А. Макушева // Вестник СибАДИ. – Вып. 3 (43). – 2015. – С. 20 – 25.
3. Макушев, Ю.П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей : учебное пособие / Ю.П. Макушев, А.П. Жигadlo, Л.Ю. Волкова. – Омск : СибАДИ, 2017.– 208 с.
4. Интегральное и дифференциальное исчисления в приложении к технике : монография / Ю.П. Макушев, Т.А. Полякова, В.В. Рындин и др.; под ред. Ю.П. Макушева. – Павлодар : Кереку, 2013. – 330 с.
5. Тер-Мкртчян, Г.Г. Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами : учебное пособие / Г.Г. Тер-Мкртчян. – М. : МАДИ, 2015. – 80 с.
6. Батурин, О.В. Конспекты лекций по учебной дисциплине «Теория и расчет лопаточных машин» : учебное пособие / О.В. Батурин. – Самара : СГАУ, 2011. – 241 с.
7. Макушев, Ю.П. Расчет систем и механизмов двигателей внутреннего сгорания математическими методами: учебное пособие / Ю.П. Макушев [и др.]. – Омск : СибАДИ, 2011.– 284 с.