

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СХЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пособие
для студентов специальности 1-37 01 01
«Двигатели внутреннего сгорания»

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

Минск
БНТУ
2022

УДК 621.43(075.8)

ББК 31.365я7

A59

С о с т а в и т е л ь

В. В. Альферович

Р е ц е н з е н т ы:

зав. кафедрой «Технологии и организация технического сервиса»

БГАТУ, канд. техн. наук *В. Е. Тарасенко*;

начальник отдела силовых агрегатов ГНУ «Объединенный

институт машиностроения НАН Беларуси» *А. С. Климук*

Альтернативные схемы двигателей : пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / сост.: В. В. Альферович. – Минск : БНТУ, 2022. – 49 с.

ISBN 978-985-583-432-9.

Пособие составлено в соответствии с программой дисциплины «Альтернативные схемы двигателей внутреннего сгорания» и предназначено для студентов, выполняющих лабораторные работы по этой дисциплине. Пособие включает восемь работ. В каждой лабораторной работе приводятся общие сведения по изучаемому вопросу, дается описание схемы двигателя или альтернативного топлива, а также представлены контрольные вопросы для самопроверки.

УДК 621.43(075.8)

ББК 31.365я7

ISBN 978-985-583-432-9

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

- проверку самостоятельной подготовки студентов к работе;

- изложение преподавателем целей и содержания работы;
- выполнение работы;
- защиту оформленной работы.

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

Лабораторная работа № 1
**АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ
РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Цель работы:

1. Приобретение навыков в самостоятельной критической оценке работоспособности и перспективности рассматриваемого технического решения.
2. Изучение кинематической схемы роторно-поршневого двигателя (РПД) и принципа его работы.
3. Ознакомление с особенностями конструкции основных деталей РПД (ротора, уплотнительных пластин, эксцентрика).
4. Рассмотрение применяемых конструкционных материалов.
5. Закрепление теоретических знаний по вопросам конструирования РПД.

Общие положения

Одной из альтернатив традиционному поршневому двигателю внутреннего сгорания является РПД, который часто называют по имени его изобретателя – двигателем Ванкеля. Феликс Ванкель – изобрел роторно-поршневой двигатель в возрасте 22 лет, в 1924 году. В 1934 году Ванкель получил свой первый патент на двигатель новой конструкции, а в 1954 году он нашел оптимальную конфигурацию камеры сгорания РПД. Один из первых двигателей (DKM-54), созданных Ванкелем, имел рабочий объем 0,25 л и развивал мощность около 20 кВт при частоте вращения $17\ 000\ \text{мин}^{-1}$, а уже в 1958 г. увидел свет первый автомобиль с серийным РПД.

В общем случае РПД представляет собой тепловой двигатель, в котором функцию поршня выполняет ротор, грани которого воспринимают силы давления газов и передают их на эксцентриковый вал, вызывая его вращение. Кинематическая схема РПД представлена на рис. 1.1.

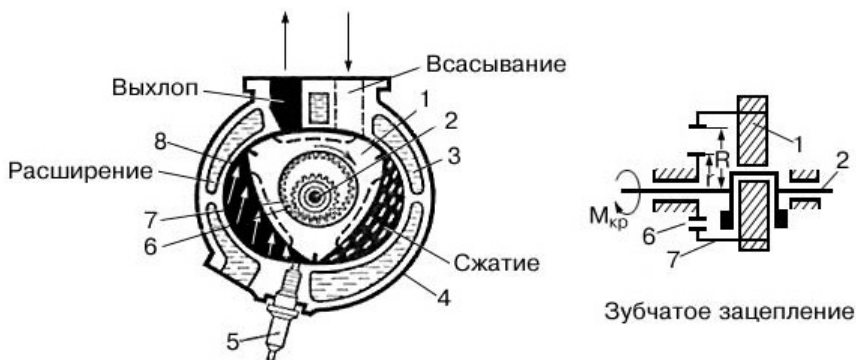


Рис. 1.1. Кинематическая схема РПД:

1 – ротор; 2 – эксцентриковый вал; 3 – рубашка охлаждения;
 4 – корпус; 5 – свеча зажигания; 6 – зубчатое колесо,
 закрепленное на корпусе; 7 – зубчатое колесо внутреннего
 зацепления, закрепленное на роторе; 8 – зеркало (эпитрохоида)

Основной деталью РПД является трехгранный ротор, установленный с возможностью вращения на эксцентриковом валу. На роторе закреплено зубчатое колесо внутреннего зацепления, которое обкатывается по неподвижному колесу, установленному на корпусе. Соотношение чисел зубьев колес равно $3/2$, что обеспечивает планетарное перемещение ротора. В каждый момент времени между корпусом и ротором образованы три циклически изменяющихся замкнутых объема, в которых и протекает рабочий процесс.

Свежий заряд поступает в одну из камер через впускной канал, последовательно сжимается, воспламеняется одной или двумя свечами зажигания, расширяется, поворачивает ротор, т. е. совершает работу и выходит в атмосферу через выпускной канал. Для герметизации камер ротор снабжен радиальными и торцовыми уплотнительными элементами.

Ротор вращается втрое медленнее вала. За полный оборот ротора совершаются три рабочих такта. Каждая из трех камер ротора успевает пройти мимо свечи зажигания, которая воспламеняет сжатую в камере смесь. Следовательно, у РПД три

рабочих такта совершаются за три оборота его вала и по равномерности работы этот двигатель подобен одноцилиндровому двухтактному или двухцилиндровому четырехтактному ДВС. Рабочий объем одной камеры представляет собой разность между ее максимальным и минимальным объемами, а степень сжатия выражается отношением этих объемов.

Газораспределение в двигателе осуществляется путем перекрытия впускного и выпускного каналов ротором. В положении, когда ротор одновременно открывает оба канала, происходит перекрытие фаз газораспределения аналогично перекрытию клапанов в ГРМ обычных четырехтактных двигателей.

Главное принципиальное преимущество роторных двигателей – это полное отсутствие возвратно-поступательных движений любого типа, а соответственно, постоянных циклических ускорений и знакопеременных инерционных нагрузок на детали двигателя. Именно подобные нагрузки не дают традиционным поршневым двигателям значительно увеличивать частоту вращения коленчатого вала и наращивать мощность.

Второе преимущество, неразрывно связанное с первым, – это прямой и непосредственный перевод простого и непрерывного вращения ротора во вращение рабочего вала двигателя.

По сравнению с поршневым ДВС, роторный двигатель не нуждается в специальном механизме газораспределения, КШМ, и соответственно, в корпусных объемах картера для размещения этих механизмов. Следствием этого является большая, чем у поршневых двигателей, удельная мощность, а также относительная простота конструкции.

Недостатки РПД:

– газораспределение осуществляется вершиной ротора и поэтому неизбежен частичный выброс свежей смеси в выпускное окно;

– велика утечка смеси из одной камеры в другую, и при прохождении вершины ротора над отверстием в зеркале цилиндра для свечи зажигания;

- вибрация радиальных уплотнительных пластин, вызываемая силами инерции, способствует прорыву сжатой смеси в соседнюю камеру, что ощутимо увеличивает расход топлива;
- из-за большой поверхности КС и нерациональной ее формы процесс сгорания происходит не полностью, что увеличивает выброс вредных веществ с отработавшими газами и расход топлива;
- РПД плохо приспособляется к изменению нагрузки из-за малого рабочего диапазона устойчивой частоты вращения;
- зеркало цилиндра изношенного двигателя требует применения дорогостоящих станков и электролитического восстановления;
- недостаточная надежность радиальных и торцовых уплотнений ротора.

Ротор является наиболее сложной деталью и его чаще всего изготавливают из чугуна. В нем монтируются уплотнительные пластины, прижимаемые к рабочей поверхности цилиндра ленточными пружинами. Чтобы они изнашивались равномерно, их делают разрезными, а цилиндрические сухарики обеспечивают их правильную установку относительно ротора. Во время работы ротор непосредственно не соприкасается с зеркалом цилиндра, т. к. контакт осуществляется через радиальные и торцевые пластины. Радиальные уплотнительные пластины завод НСУ-*Wankel* изготавливал сначала из графита, а затем из хромистого чугуна, близкого по составу с материалом поршневых колец.

Зеркало алюминиевого корпуса, выполненного по эпитрохоиде, для уменьшения износа покрывается твердым хромом либо слоем карбида вольфрама толщиной 0,2–0,3 мм. Более редко встречалось покрытие, состоящее из слоя никеля с пылевидными частицами карбида кремния, а также металлокерамики.

Контрольные вопросы

1. Рассказать о конструкции и принципе работы РПД.
2. Перечислить достоинства и недостатки РПД.
3. Сформулировать условия работы уплотнительных элементов.
4. Объяснить особенности протекания рабочего цикла РПД.
5. Сравнить коэффициенты наполнения РПД и четырехтактного поршневого ДВС.

Лабораторная работа № 2
**СИСТЕМЫ СМАЗОЧНАЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ
РОТОРНО-ПОРШЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Цель работы:

1. Приобретение навыков в самостоятельной критической оценке работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.
2. Анализ схем систем смазочной и охлаждения.
3. Рассмотрение применяемых эксплуатационных материалов.
4. Закрепление теоретических знаний по системам охлаждения и смазывания.

Общие положения

Применительно к РПД проблема охлаждения и смазки была в основном решена. Для большинства типов РПД, в том числе и РПД Ф. Ванкеля, дополнительно применяют охлаждение внутренней полости ротора смазочным маслом (в некоторых случаях – бензо-масло-воздушной смесью). На представленной схеме (рис. 2.1) принудительная циркуляция масла происходит под действием шестеренчатого насоса, а температура его на нужном уровне поддерживается с помощью водяного теплообменника. После теплообменника масло поступает в масляный фильтр и далее, через центральную масляную магистраль в эксцентриковом валу, к поверхностям трения и во внутренние полости роторов для их охлаждения, а также к приборам контроля. Значительное тепловое воздействие на масло требует применения масляного радиатора в системе.

Систему смазывания регулируют таким образом, чтобы на частоте вращения холостого хода обеспечить давление в системе не менее 20 кПа. Смазывание пары зеркало цилиндра – уплотнительные элементы ротора осуществляют, как правило, подмешиванием масла в топливо в пропорции 1/500–1/200.

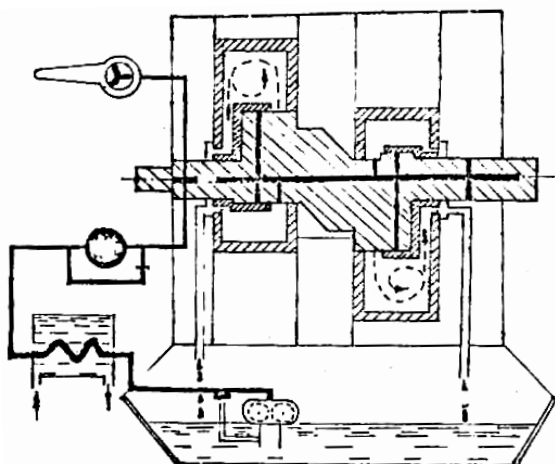


Рис. 2.1. Схема смазочная и охлаждения ротора РПД

Некоторые фирмы применяли охлаждение ротора потоком свежего заряда, который пропускали через внутреннюю полость ротора. Такое же охлаждение имел и двигатель ВНИИмотопроста для тяжелого мотоцикла. Что касается охлаждения корпуса, то как жидкостное, так и воздушное принципиально не отличается от традиционного охлаждения поршневого двигателя. Следует только иметь в виду, что каждый такт РПД всегда протекает в одной и той же зоне цилиндра. Из сказанного следует, что есть горячая зона корпуса, где протекает такт расширения, и холодная часть корпуса, где протекает такт впуска.

Порядок выполнения работы

1. Разобраться с конструктивными схемами смазочной и охлаждения.
2. Используя учебно-наглядные пособия, изучить отличительные конструктивные решения в системе смазки и охлаждения.

3. Дать оценку применяемым эксплуатационным материалам.
4. Изобразить схему системы охлаждения и смазки ротора по согласованию с преподавателем. Сделать предложение об изменении конструкции одного из узлов, входящих в схему.

Контрольные вопросы

1. Какие типы схем охлаждения и смазки применяют в РПД?
2. Объясните имеющиеся гидравлические сопротивления в системе, характер их изменений в процессе эксплуатации.
3. Почему в системе смазки РПД необходимо повышенное давление?
4. Назовите марки применяемых эксплуатационных материалов.
5. Какие мероприятия следует проводить в процессе эксплуатации, какие требования необходимо соблюдать, чтобы обеспечить нормальное функционирование систем охлаждения и смазки?

Лабораторная работа № 3

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА РПД

Цель работы:

1. Ознакомление с рабочим процессом РПД.
2. Приобретение навыков в самостоятельной критической оценке работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.

Общие положения

В РПД возвратно-поступательное движение поршня заменяется вращательным движением ротора, во время которого объемы полостей, образованных между стенками корпуса и поверхностью ротора, изменяются от минимальной до максимальной величины. В рассматриваемых РПД корпус имеет эпитрохоидальный профиль, по которому движутся вершины треугольного ротора. Полный его оборот совершается за три оборота эксцентрикового вала, который одновременно является и валом отбора мощности. За один оборот ротора в каждой рабочей полости дважды происходит полный цикл изменения объема, что позволяет при наличии одного впускного и одного выпускного окна осуществить четырехтактный цикл.

Впуск

В трех рабочих полостях отдельные фазы рабочего процесса сдвинуты друг относительно друга на 120 град. угла поворота ротора. Фазы начала и конца каждого такта определяются положением вершин ротора относительно впускного и выпускного окон. В отличие от поршневого двухтактного двигателя окна в корпусе роторно-поршневого двигателя все время открыты и соединяют соответствующие каналы с какой-либо полостью. Вследствие этого отдельные фазы рабочих процессов в смежных полостях роторно-поршневого дви-

гателя частично перекрываются. Проследить протекание отдельных процессов в полостях РПД наиболее удобно по *круговой диаграмме* (рис. 3.1). На этой диаграмме начало и конец фазы рабочего процесса определяются положением конца вектора, соединенного с вершиной ротора, вращающегося вокруг оси эксцентрикового вала и проходящего через характерные точки эпитрохоидального профиля, определяющие начало и конец фаз.

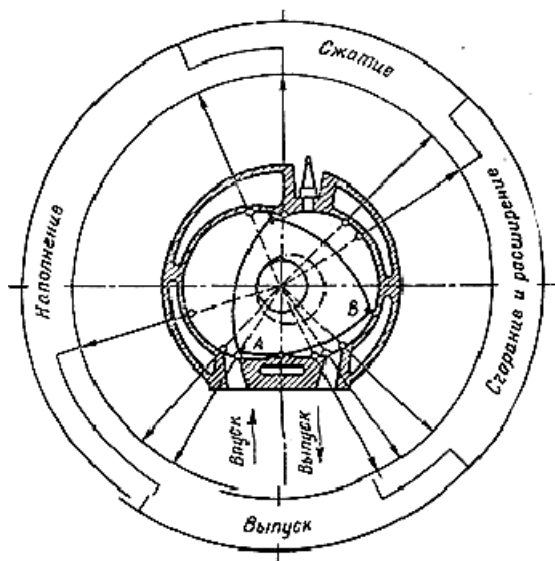


Рис. 3.1. Диаграмма фаз газораспределения

Центральный угол поворота вектора равен углу поворота ротора относительно корпуса. Учитывая, что эксцентриковый вал вращается в три раза быстрее ротора, все углы поворота ротора необходимо умножать на три, чтобы определить углы поворота эксцентрикового вала. Во время начальной стадии процесса наполнения возможна продувка полости, в которой заканчивается расширение. Процесс наполнения начинается с момента открытия вершиной треугольного ротора впускного

окна. При прохождении вершиной ротора зоны впускного окна выпускное окно все время полностью открыто. Продувка заканчивается в момент отсечки выпускного окна вершиной **В** ротора. Угол поворота ротора, соответствующий процессу продувки, составляет около 40 град. и определяется положением внутренних кромок впускного и выпускного окон. После отсечки вершиной ротора выпускного окна начинается наполнение при увеличении объема полости. В конце этого периода, занимающего примерно 100° угла поворота ротора, скорость изменения объема полости уменьшается. Так как в этот момент впускные окна еще открыты, а скорость смеси во впускном трубопроводе достаточно велика, происходит дозарядка рабочей полости. Использование динамических явлений во впускном трубопроводе позволяет получать достаточно высокий коэффициент наполнения даже при высоком числе оборотов ротора. На рис. 3.2 показана зависимость коэффициента наполнения от частоты вращения вала отбора мощности.

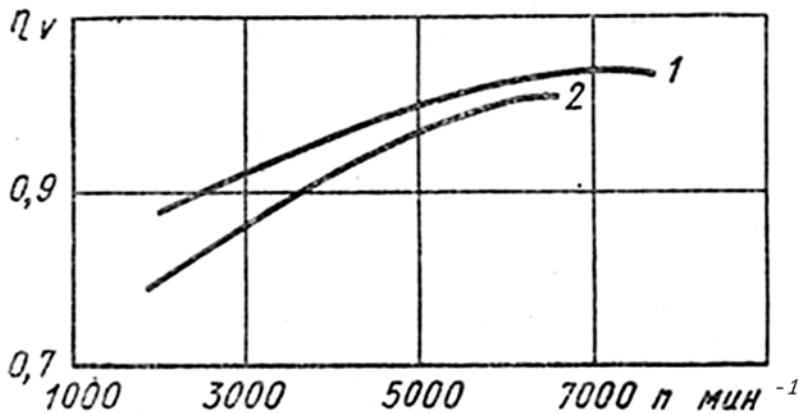


Рис. 3.2. Зависимость коэффициента наполнения от частоты вращения

Как видно из графика, с ростом частоты вращения коэффициент наполнения возрастает, достигая величины больше еди-

ницы (без учета продувки). Такой характер изменения коэффициента наполнения обуславливает меньший, по сравнению с поршневыми двигателями, коэффициент приспособляемости роторно-поршневых двигателей и неблагоприятное протекание характеристики при использовании их в качестве транспортных двигателей.

Во время продувки небольшая часть заряда выбрасывается в выпускной трубопровод, что снижает экономичность двигателей. При работе двигателя на номинальном режиме коэффициент наполнения (включая потери при продувке) $\eta_V = 0,88-0,96$, причем большие значения относятся к двигателям с большим числом оборотов.

Сжатие

Сжатие рабочей смеси начинается после перекрытия вершинной ротора впускного окна и заканчивается при достижении минимального объема. Процесс сжатия характеризуется несколько большими утечками рабочего тела через уплотнительные пластины ротора, чем в поршневом двигателе, и меньшей теплоотдачей в стенки. По экспериментальным данным показатель политропы сжатия в роторно-поршневых двигателях $n_1 = 1,36-1,39$, т. е. несколько больше, чем в поршневом двигателе с внешним смесеобразованием. Сжатие смеси соответствует примерно 80 град. угла поворота ротора. В конце процесса сжатия в течение времени, соответствующего примерно 10 град. угла поворота ротора, одновременно с уменьшением объема полости происходит первая фаза сгорания смеси. В роторно-поршневых двигателях, изменяя форму ротора и параметр формы эпитрохоиды, можно получить степень сжатия до 11–12. Однако при таком увеличении степени сжатия значительно ухудшается форма камеры сгорания, и соответственно, снижается экономичность. Минимальный удельный расход топлива получается при $\varepsilon = 9-11$. Практически степень сжатия выбирают в пределах 8,5–10. На рис. 3.3 показано изменение

среднего эффективного давления p_e и удельного расхода топлива g_e , в зависимости от степени сжатия.

Сгорание

Процесс сгорания в роторно-поршневых двигателях начинается за 10–15 град. угла поворота ротора до момента достижения минимального объема камеры сгорания. При достижении минимального объема камера сгорания представляет собой узкую щель с двумя клинообразными окончаниями, сжатую в средней части выступом эпитрохоидального профиля корпуса двигателя. При движении ротора отношение объемов двух частей камеры сгорания изменяется, и рабочее тело перетекает из одной части в другую. Для уменьшения потерь при перетекании заряда в теле ротора имеется выемка.

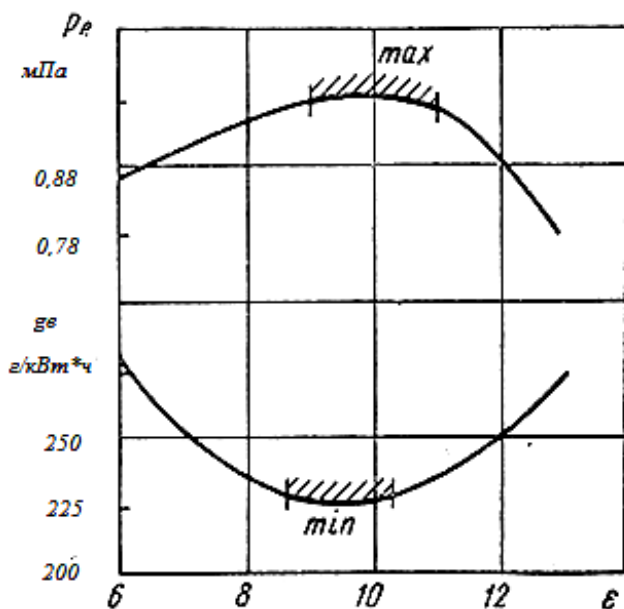


Рис. 3.3. Зависимость среднего эффективного давления и эффективного расхода топлива от степени сжатия

Воспламенение рабочей смеси производится одной или двумя свечами зажигания. В случае применения одной свечи зажигания ее устанавливают в задней части камеры сгорания, расположенной ближе к выпускным окнам двигателя. Фронт пламени движется навстречу потоку смеси, вытесняемой из уменьшающейся части камеры сгорания. При использовании двух свечей зажигания одну из них устанавливают в задней части камеры сгорания, а другую – в передней. К особенностям роторно-поршневого двигателя следует отнести малую скорость изменения объема камеры сгорания по углу поворота вблизи ВМТ. Это приводит к тому, что сгорание успевает закончиться к моменту значительного увеличения скорости нарастания объема. Хотя сгорание в этих двигателях происходит по времени медленнее, чем в поршневых, это не вызывает значительного ухудшения индикаторного КПД в связи с более медленным ростом объема камеры сгорания. Узкая щелевидная камера сгорания с развитыми поверхностями уменьшает склонность двигателя к детонации. Как показывают эксперименты, роторно-поршневые двигатели могут работать на низкооктановых топливах (с октановым числом 66 или 72) без детонации при степени сжатия 9. Зона корпуса двигателя, в которой происходит сгорание смеси, не омывается холодными газами при наполнении, поэтому температура стенки корпуса в этом месте выше, чем у поршневого двигателя.

Расширение

Когда сгорание в основном закончилось, начинается расширение рабочего тела. Период расширения рабочего тела соответствует примерно 90 град. угла поворота ротора. Затем открывается выпускное окно, и во время поворота ротора примерно на 20 град. происходит свободный выпуск отработавших газов.

Выпуск

Выпуск отработавших газов можно разбить на четыре периода. Первый – от момента открытия выпускного окна до достижения максимального объема полости. Второй – принудительный выпуск, протекает при уменьшающемся объеме полости до момента открытия впускного окна (примерно 60 град. угла поворота ротора). Третий – выпуск, совмещенный с предварением впуска, происходит при уменьшающемся объеме полости, но при наличии продувки. Четвертый – окончание выпуска, совмещен со свободным выпуском из следующей полости (продолжительность этого периода соответствует примерно 10 град. угла поворота ротора). Общая продолжительность процесса выпуска около 120 град. угла поворота ротора. По экспериментальным данным средний показатель политропы расширения меньше, чем в бензиновых поршневых двигателях, и составляет 1,2–1,15, что свидетельствует о подводе значительного количества теплоты в процессе расширения. Температура конца расширения несколько выше, чем в поршневых двигателях, т. е. $T_b = 1850\text{--}1900\text{ К}$.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие рабочего процесса РПД от аналогичного процесса поршневого ДВС?
2. Рассказать о фазах газораспределения.

Лабораторная работа № 4
**ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ И ТЕПЛОВОЙ
БАЛАНС РПД**

Цель работы:

1. Приобретение навыков в самостоятельной критической оценке основных параметров РПД.
2. Ознакомление с внешней скоростной и нагрузочной характеристиками РПД.
3. Ознакомление с внешним тепловым балансом РПД.

Общие положения

В роторно-поршневых двигателях среднее индикаторное и эффективное давления, индикаторную и эффективную мощности и коэффициенты полезного действия подсчитывают так же, как и для поршневых двигателей. При подсчете индикаторной и эффективной мощностей следует иметь в виду, что за один оборот вала отбора мощности (для рассматриваемой схемы двигателя) происходит один рабочий цикл. Механический КПД в роторно-поршневых двигателях несколько выше, чем в бензиновых поршневых двигателях, и составляет 0,85–0,9 при максимальной мощности.

На рис. 4.1 приведена внешняя скоростная характеристика роторно-поршневого двигателя.

Отличительной особенностью внешней характеристики этого двигателя является пологое протекание кривой эффективного расхода топлива, высокое значение коэффициента наполнения при большем числе оборотов и уменьшение крутящего момента при снижении числа оборотов. Положительной особенностью нагрузочной характеристики является почти постоянное значение удельного эффективного расхода топлива при изменении нагрузки от максимальной до 0,5 n_e , что обеспечивает сравнительно низкий расход топлива при движении автомобиля по пересеченной местности.

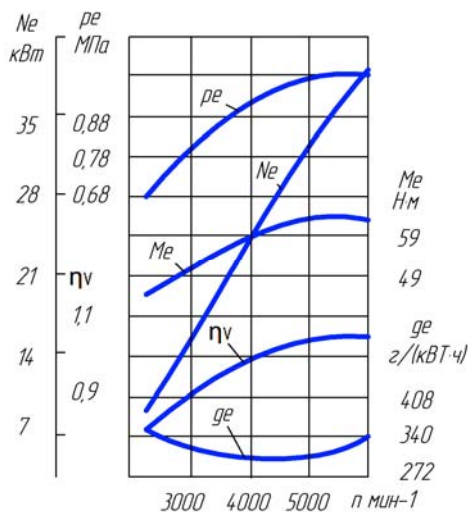


Рис. 4.1. Внешняя скоростная характеристика

Тепловой баланс РПД характеризуется уменьшением доли теплоты, отводимой с охладителем от корпуса двигателя, и увеличением доли теплоты, отводимой от смазывающего масла, которое подогревается при омывании нагретого ротора. Составляющие внешнего теплового баланса роторно-поршневого двигателя имеют следующие величины:

$$q_e = 21-28 \%;$$

$$q_v = 15-25 \%;$$

$$q_{z. \phi} = 25-45 \%;$$

$$q_{z. x} = 0-30 \%;$$

$$q_{ост} = 4-9 \%.$$

Контрольные вопросы

1. В чем различие внешних скоростных характеристик РПД и поршневого ДВС?
2. Рассказать о внешнем тепловом балансе РПД.

Лабораторная работа № 5 ДВИГАТЕЛЬ КУШУЛЯ

Цель работы:

1. Приобретение навыков в самостоятельной критической оценке работоспособности и перспективности рассматриваемого технического решения.
2. Ознакомление с конструкцией двигателя.
3. Ознакомление с особенностями рабочего процесса двигателя.
4. Выявление недостатков двигателя.

Общие положения

В 60-х годах XX столетия профессор Ленинградского института авиационного приборостроения В. М. Кушуль предложил двигатель, в котором попарно расположенные цилиндры сообщаются между собой через короткий тангенциальный канал, выполненный в головке. Движение поршней синхронизировано и происходит с некоторым сдвигом по фазе. Поршень второго цилиндра отстает на 22–24 град. ПКВ от первого поршня, что достигается специальным расположением цапфы прицепного шатуна (рис. 5.1).

Камеру сгорания имеет только один цилиндр, обозначенный на схеме цифрой I. В него и подается, как в обычном карбюраторном двигателе, горючая богатая смесь. Цилиндр II заполняется, как в дизеле, чистым воздухом. Поршень этого цилиндра в ВМТ подходит к головке цилиндров с минимально возможным зазором, поэтому весь его воздушный заряд через короткий и широкий соединительный канал вытесняется в камеру сгорания цилиндра I.

Подача заряда горючей смеси в цилиндр I и воздуха в цилиндр II происходит одновременно (естественно, по отдельным впускным трактам). Смесь в цилиндре I сжимается до степени сжатия 6,5–7, как в обычном карбюраторном двигателе.

ле, и воспламеняется от запальной свечи системы зажигания за 10–12 град. ПКВ до прихода поршня в ВМТ. Поршень цилиндра II в этот момент будет находиться от ВМТ на расстоянии, соответствующем 34–36 град. ПКВ, и объем над ним будет примерно равен объему камеры сгорания цилиндра I.

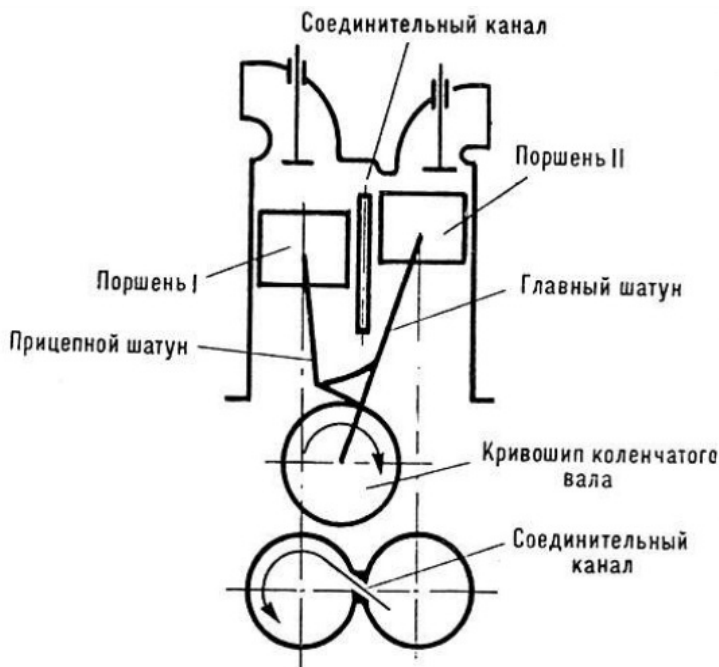


Рис. 5.1. Двигатель В. М. Кушуля

Следовательно, на этой первой фазе, несмотря на то, что цилиндры сообщаются между собой, в них одновременно происходят различные процессы: в первом – сгорание, а во втором – сжатие (с возможным крайне незначительным перетеканием сжатого воздуха в цилиндр I).

Когда поршень цилиндра I приходит в ВМТ и сгорание в нем в основном заканчивается, воздушный заряд в цилиндре II, достигнув 20–22-кратной степени сжатия (втрое большей,

чем была в цилиндре I), начинает перетекать в цилиндр I, преодолевая давление образовавшихся в нем газов сгорания. В этих газах из-за недостатка кислорода содержится значительная доля несгоревшего топлива. Поступивший сюда кислород вступает в реакцию с продуктами неполного сгорания. Начинается вторая фаза процесса сгорания. Тангенциальное к поверхности цилиндра направление соединительного канала обеспечивает интенсивное завихрение газов потоком сжатого воздуха, что способствует полному сгоранию всего топлива (это было подтверждено анализом отработавших газов и отсутствием нагарообразования в камере сгорания и на днищах поршней).

Таким образом, сначала (фаза 1) происходит воспламенение и сгорание рабочей смеси при невысокой степени сжатия, умеренных температуре и давлении газов и недостатке кислорода, а затем (фаза 2) – сгорание недогоревшей части топлива с участием сжатого воздушного заряда.

Во время второй фазы сгорания поршни движутся в противоположных направлениях. Сгорание с участием воздушного заряда из цилиндра II начинается в тот момент, когда поршень цилиндра I приходит в ВМТ, а заканчивается, когда в ВМТ приходит поршень цилиндра II (это положение и показано на схеме). Следовательно, суммарный объем над поршнями в начале и в конце второй фазы сгорания будет одинаковым, а это означает, что сгорание происходит при постоянном объеме; благодаря этому обеспечивается высокая степень расширения газов после сгорания, равная 10,5–11.

Оба цилиндра в одинаковой степени являются рабочими – каждый из них заполняется своим свежим зарядом, в каждом происходят процессы сжатия, а затем в обоих (поскольку они соединены каналом) – расширения рабочего тела. В конце процесса расширения в них одновременно открываются выпускные клапаны.

Благодаря ступенчатому подводу теплоты, малому изменению объема за вторую фазу сгорания и высокой степени по-

следующего адиабатического расширения газа, по мнению автора, температура и давление газов в начале процесса расширения будут значительно выше, чем в обычных двигателях, а в конце – значительно ниже. За счет такого увеличения температурного перепада и возрастает термический КПД: он на 20–25 % больше, чем у обычного карбюраторного двигателя.

Контрольные вопросы

1. Выполнить анализ конструкции двигателя.
2. Рассказать об особенностях рабочего процесса.
3. Выявить и оценить основные недостатки двигателя.

Лабораторная работа № 6

ПРИНЦИП РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

Цель работы:

1. Приобретение навыков в самостоятельной критической оценке работоспособности и перспективности рассматриваемого технического решения.
2. Ознакомление с конструкцией и рабочим процессом двигателя.
3. Ознакомление с идеальным циклом двигателя.
4. Рассмотрение преимуществ и недостатков двигателя.
5. Ознакомление с областями применения.

Общие положения

Двигатель Стирлинга – тепловая машина, в которой рабочее тело в виде газа или жидкости движется в замкнутом объеме, разновидность двигателя внешнего сгорания. Рабочий процесс основан на периодическом нагревании и охлаждении рабочего тела с извлечением механической энергии из возникающего при этом изменения объема рабочего тела. Может работать не только от сжигания топлива, но и от любого источника тепла. Для работы годится любой источник тепла: энергия солнца, навоз, сено, дрова, уголь, нефть, газ, ядерный реактор и т. д. И при данной «всеядности» коэффициент полезного действия «Стирлингов» не уступает показателям двигателей внутреннего сгорания. Кроме того, Стирлинг-машины обратимы. Т. е. подводя тепловую энергию, получается механическая энергия, а раскручивая маховик двигателя, вырабатывается холод.

В XIX веке инженеры хотели создать безопасную замену паровым двигателям того времени, котлы которых часто взрывались из-за высоких давлений пара и неподходящих материалов для их постройки. Хороший вариант появился с созданием двигателя Стирлинга, который мог преобразовывать в работу любую разницу температур. Основной принцип ра-

боты двигателя Стирлинга заключается в постоянном чередовании нагрева и охлаждения рабочего тела в замкнутом объеме. Обычно в роли рабочего тела выступает воздух, но также используются водород и гелий. В ряде опытных образцов испытывались фреоны, двуокись азота, сжиженный пропан-бутан и вода. В последнем случае вода остается в жидком состоянии на всех участках термодинамического цикла. Особенности «стирлинга» с жидким рабочим телом являются малые размеры, высокая удельная мощность и большие рабочие давления. Существует также «стирлинг» с двухфазным рабочим телом. Он тоже характеризуется высокой удельной мощностью, высоким рабочим давлением.

Термодинамический цикл

Из термодинамики известно, что давление, температура и объем идеального газа взаимосвязаны и следуют закону:

$$PV = \nu RT,$$

где P – давление газа;

V – объем газа;

ν – количество молей газа;

R – универсальная газовая константа;

T – температура газа в кельвинах.

Это означает, что при нагревании газа его объем увеличивается, а при охлаждении – уменьшается. Это свойство газов и лежит в основе работы двигателя Стирлинга.

Двигатель Стирлинга использует цикл, который по термодинамической эффективности не уступает циклу Карно и даже обладает преимуществом. Как известно, цикл Карно состоит из мало отличающихся между собой изотерм и адиабат. Практическое воплощение этого цикла малоперспективно. Цикл Стирлинга (рис. 6.1) позволил получить работающий на практике двигатель в приемлемых размерах.

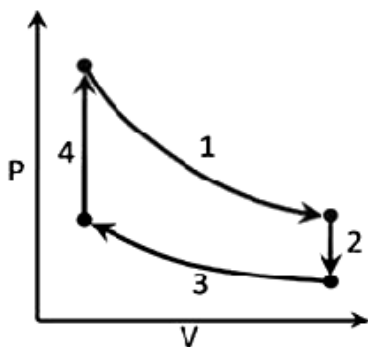


Рис. 6.1. Диаграмма идеального цикла Стирлинга

Цикл Стирлинга состоит из четырех фаз и разделен двумя переходными фазами: нагрев, расширение, переход к источнику холода, охлаждение, сжатие и переход к источнику теплоты. Таким образом, при переходе от теплого к холодному источнику происходит расширение и сжатие газа, находящегося в цилиндре. При этом изменяется давление, за счет чего можно получить полезную работу.

Нагрев и охлаждение рабочего тела (участки 4 и 2, рис. 6.1) производится вытеснителем. В идеале количество теплоты, отдаваемое и отбираемое вытеснителем, одинаково. Полезная работа производится только за счет изотерм, то есть зависит от разницы температур нагревателя и охладителя, как в цикле Карно.

Принцип работы двигателя можно рассмотреть на рис. 6.2.

Условно можно выделить четыре характерные фазы работы:

а) *фаза сжатия при постоянной температуре (t) рабочего тела (газа)* (рис. 6.2, а): поршень-вытеснитель 1 находится вблизи ВМТ и остается условно неподвижным. Газ сжимается рабочим поршнем 2, движущимся слева направо, и поступает в холодную полость 3 под поршнем-вытеснителем. Давление газа возрастает, а температура остается постоянной, так как теплота сжатия отводится через стенки цилиндра 4 и холодильник 5 в окружающую среду при температуре t'' ;

б) фаза нагревания при постоянном объеме (рис. 6.2, б): рабочий поршень 2 находится вблизи ВМТ и перемещает холодный сжатый газ из полости 3 в горячую полость 6 над поршнем-вытеснителем. При прохождении газа через регенератор 7, заполненный пористой массой, нагретой в предыдущем цикле, его температура повышается от t'' до t' . Так как при этом суммарный внутренний объем цилиндров двигателя остается постоянным, давление газа в них повышается и достигает максимального значения;

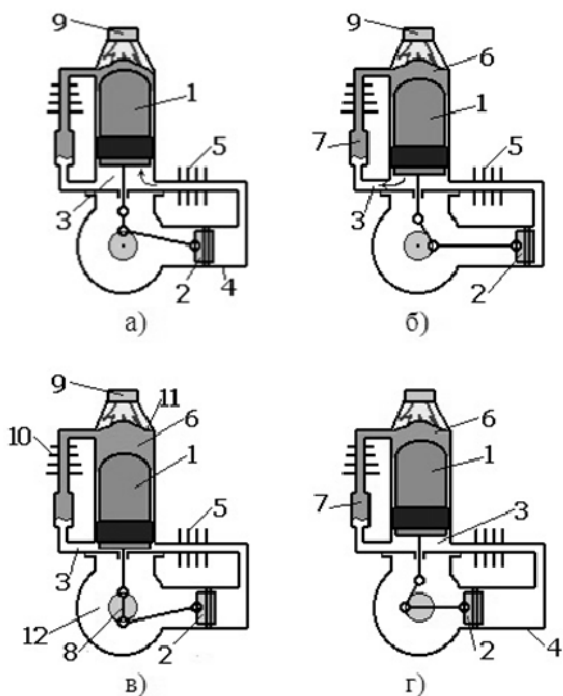


Рис. 6.2. Двигатель Стирлинга

в) фаза расширения при постоянной температуре газа (рис. 6.2, в): поршень-вытеснитель 1 находится вблизи НМТ и остается условно неподвижным. Рабочий поршень 2 под

действием давления газа движется справа налево, происходит расширение горячего газа в полости *б*. Полезная работа, совершаемая рабочим поршнем *2*, через кривошипно-шатунный механизм *8* передается на вал двигателя. Давление в цилиндрах двигателя падает, а температура газа в горячей полости *б* остается постоянной, так как к нему подводится тепло от горячего источника (от горелки *9*) через теплообменник-нагреватель *10* и стенки цилиндра *11* при температуре t' .

Рабочий поршень *2* в этой части цикла одновременно сжимает газ, находящийся в герметичной буферной емкости-картере *12*. Запасенная таким образом энергия идет на сжатие газа в процессе фазы *1* следующего цикла;

г) *фаза охлаждения при неизменном объеме* (рис. 6.2, *з*): рабочий поршень *2* находится вблизи НМТ и остается условно неподвижным. Поршень-вытеснитель *1* движется к ВМТ и перемещает газ, оставшийся в горячей полости *б*, в холодную полость *3*. При прохождении через регенератор *7* горячий газ отдает свое тепло пористой массе и охлаждается от t' до t'' . Так как при этом суммарный внутренний объем цилиндров двигателя остается постоянным, давление газа в них продолжает падать и достигает минимального значения.

Регенерация тепла в рабочем цикле позволяет работать в большом интервале температур, а следовательно, с высоким КПД – близким к максимально возможному значению.

Модификации двигателя

Двигатели Стирлинга в зависимости от конструкции подразделяют на три модификации (рис. 6.3):

1. **Альфа-Стирлинг** (*а*) – 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 объему достаточно велико, но, к сожалению, высокая темпе-

ратура «горячего» поршня создает определенные технические трудности. Регенератор находится между горячей частью соединительной трубки и холодной.

2. **Бета-Стирлинг (б)** – цилиндр всего один, горячий с одного конца и холодный с другого. Внутри цилиндра движутся поршень (с которого снимается мощность) и вытеснитель, изменяющий объем горячей полости. Газ перекачивается из холодной части цилиндра в горячую через регенератор. Регенератор может быть внешним как часть теплообменника или совмещенным с поршнем-вытеснителем.

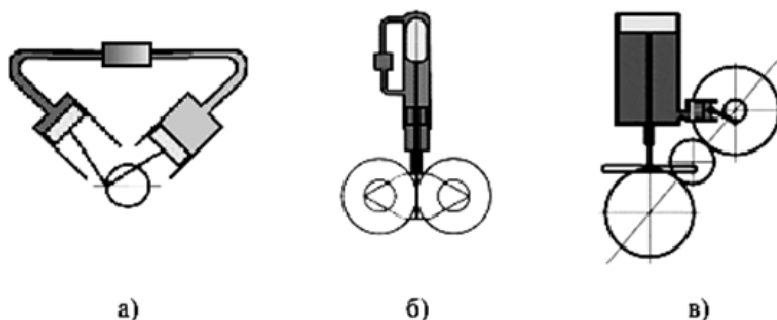


Рис. 6.3. Модификации двигателей Стирлинга:
а – Альфа-Стирлинг; б – Бета-стирлинг с ромбическим механизмом и регенератором; в – Гамма-Стирлинг без регенератора

3. **Гамма-Стирлинг (в)** – тоже есть поршень и вытеснитель, но при этом два цилиндра – один холодный (там движется поршень, с которого снимается мощность), а второй – горячий с одного конца и холодный с другого (там движется вытеснитель). Регенератор может быть внешним, в этом случае он соединяет горячую часть второго цилиндра с холодной и одновременно с первым (холодным) цилиндром. Внутренний регенератор является частью вытеснителя.

4. Также существуют разновидности двигателя Стирлинга, не попадающие под вышеуказанные три классических вида – **роторный двигатель Стирлинга**.

К недостатком двигателя можно отнести:

– громоздкость и материалоемкость – основной недостаток поршневых вариантов двигателя. У двигателей внешнего сгорания вообще, и двигателя Стирлинга в частности, рабочее тело необходимо охлаждать, и это приводит к существенному увеличению массогабаритных показателей силовой установки за счет увеличенных теплообменников;

– для получения характеристик, сравнимых с характеристиками ДВС, приходится применять высокие давления (выше 100 атм.) и особые виды рабочего тела – водород, гелий;

– теплота подводится не к рабочему телу непосредственно, а только через стенки теплообменников. Стенки имеют ограниченную теплопроводность, из-за чего КПД оказывается ниже, чем можно было ожидать. Горячий теплообменник работает в очень напряженных условиях теплопередачи и при очень высоких давлениях, что требует применения высококачественных и дорогостоящих материалов.

Создание теплообменника, который удовлетворял бы противоречивым требованиям, – весьма нетривиальная задача. Чем больше площадь теплообмена, тем больше потери теплоты. При этом растет размер теплообменника и объем рабочего тела, не участвующий в работе. Поскольку источник теплоты расположен снаружи, двигатель медленно откликается на изменение теплового потока, подводимого к цилиндру, и не сразу может выдать нужную мощность.

Для быстрого изменения мощности двигателя используются способы, отличные от применяемых в двигателях внутреннего сгорания: буферная емкость изменяемого объема; изменение среднего давления рабочего тела в камерах; изменение фазного угла между рабочим поршнем и вытеснителем.

Тем не менее, двигатель Стирлинга имеет преимущества, которые вынуждают заниматься его разработкой:

– «всеядность» двигателя – как все двигатели внешнего сгорания (вернее – внешнего подвода теплоты), двигатель

Стирлинга может работать от почти любого перепада температур; например, между разными слоями воды в океане, от солнца, от ядерного или изотопного нагревателя, угольной или дровяной печи и т. д.;

– простота конструкции – конструкция двигателя очень проста, он не требует дополнительных систем, таких как газораспределительный механизм. Он запускается самостоятельно и не нуждается в стартере. Его характеристики позволяют избавиться от коробки передач;

– увеличенный ресурс – простота конструкции, отсутствие многих ненадежных узлов, позволяет «стирлингу» обеспечить небывалый для других двигателей запас работоспособности в десятки и сотни тысяч часов непрерывной работы;

– экономичность – для утилизации некоторых видов тепловой энергии, особенно при небольшой разнице температур, «стирлинги» часто оказываются самыми эффективными видами двигателей. Например, в случае преобразования в электричество солнечной энергии «стирлинги» иногда дают больший КПД (до 31,25 %), чем тепловые машины на пару;

– экологичность – в «стирлинге» отработавшие газы не выводятся в атмосферу, поэтому уровень его шума гораздо меньше, чем у поршневых двигателей внутреннего сгорания. Бета-стирлинг с ромбическим механизмом является идеально сбалансированным устройством и, при достаточно высоком качестве изготовления, имеет предельно низкий уровень вибраций (амплитуда вибрации меньше 0,0038 мм). Сам по себе «стирлинг» не имеет каких-то частей или процессов, которые могут способствовать загрязнению окружающей среды. Он не расходует рабочее тело. Экологичность двигателя обусловлена, прежде всего, экологичностью источника теплоты. Стоит также отметить, что обеспечить полноту сгорания топлива в двигателе внешнего сгорания проще, чем в двигателе внутреннего сгорания.

Применяемость двигателя

Двигатель Стирлинга применим в случаях, когда необходим небольшой преобразователь тепловой энергии, простой по устройству, либо когда эффективность других тепловых двигателей оказывается ниже; например, если разницы температур недостаточно для работы паровой или газовой турбины.

1. *Универсальные источники электроэнергии.* Двигатели Стирлинга могут применяться для превращения в электроэнергию любой теплоты. На них возлагают надежды по созданию солнечных электроустановок. Их применяют как автономные генераторы для туристов. Некоторые предприятия выпускают генераторы, которые работают от конфорки газовой печи.

2. *Насосы.* Эффективность систем отопления или охлаждения возрастает, если в контуре установлен насос принудительной подачи теплоносителя. Установка электрического насоса снижает живучесть системы, а в быту неприятна тем, что электросчетчик «накручивает» ощутимую сумму. Насос, использующий принцип двигателя Стирлинга, решает эту задачу. «Стирлинг» для перекачки жидкостей может быть гораздо проще привычной схемы «двигатель–насос». В двигателе Стирлинга вместо рабочего поршня может использоваться перекачиваемая жидкость, которая одновременно служит для охлаждения рабочего тела.

Насос на основе двигателя «стирлинга» может служить для накачки воды в ирригационные каналы посредством солнечного тепла, для подачи горячей воды от солнечного коллектора в дом (в системах отопления теплоаккумулятор стараются установить как можно ниже, чтобы вода шла в радиаторы самотеком). Стирлинг-насос может использоваться для перекачки химических реагентов, поскольку герметичен.

3. *Аккумуляторы энергии.* Можно запасать с его помощью энергию, используя в качестве источника тепла теплоаккумуляторы на расплавах солей. Такие аккумуляторы превосходят по запасу энергии химические аккумуляторы и дешевле их.

Используя для регулировки мощности изменение фазного угла между поршнями, можно аккумулировать механическую энергию, тормозя двигателем. В этом случае двигатель превращается в тепловой насос.

4. *Солнечные электростанции.* Двигатель Стирлинга может использоваться для преобразования солнечной энергии в электрическую. Для этого двигатель Стирлинга устанавливается в фокус параболического зеркала, таким образом, чтобы область нагрева была постоянно освещена. Параболический отражатель управляется по двум координатам при слежении за солнцем. Энергия солнца фокусируется на небольшой площади. Зеркала отражают около 92 % падающего на них солнечного излучения. В качестве рабочего тела двигателя Стирлинга используется, как правило, водород или гелий.

Контрольные вопросы

1. Рассказать о теоретическом цикле двигателя Стирлинга.
2. Дать краткий анализ модификаций двигателя.
3. Перечислить преимущества и недостатки двигателя.

Лабораторная работа № 7

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ ПЛАНЕТАРНОГО КРИВОШИПНО-РОТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ (ПКРД-1)

Цель работы:

1. Приобретение навыков в самостоятельной критической оценке работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.
2. Ознакомление с кинематической схемой механизма преобразования поступательного движения поршня во вращательное движение вала.
3. Изучение особенностей конструкций двигателей с бесшатунным силовым механизмом.
4. Углубление и закрепление знаний по конструкции бесшатунного силового механизма при разборке–сборке макетного образца двигателя ПКРД-1.

Общие положения

Внедрение новых перспективных типов двигателей с улучшенными энергетическими, массовыми и экономическими характеристиками, большим моторесурсом и надежностью, по сравнению с современными двигателями с классическим кривошипно-шатунным механизмом, имеет большое как познавательное, так и народнохозяйственное значение.

Схема силового механизма, в котором преобразование возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение вала осуществляется бесшатунным способом, имеет ряд принципиальных отличий от кривошипно-шатунного механизма обычного двигателя.

Отсутствие шатунов у таких двигателей существенно снижает величину трения поршней о стенки цилиндров, вследствие чего значительно уменьшаются механические потери, увеличивается механический и эффективный КПД двигателей,

повышается надежность цилиндропоршневой группы и создаются благоприятные условия для увеличения моторесурса двигателя и средней скорости движения поршней.

На рис. 7.1 показана схема ПКРД с зубчатым ПНМ, который обеспечивает независимость хода поршня от размеров зубчатых колес. На кривошипной шейке вала 1 на подшипниках эксцентрично с возможностью вращения установлен цилиндрический ротор 2. На нем закреплено зубчатое колесо 3, расположенное соосно кривошипной шейке вала 1 и находящееся в зацеплении с колесом 4 внутреннего зацепления, спаренного с эпициклом 5. Последний, через промежуточные шестерни 6 с закрепленными осями, связан с колесом 7, неподвижно установленном на валу 1. Необходимыми кинематическими условиями для этого ПНМ являются:

– равенство радиуса кривошипной окружности вала 1 (r) эксцентриситету ротора (e) 2;

– равенство угловых скоростей вала 1 и ротора 2, имеющих противоположные знаки (передаточное число равно минус единица).

По сравнению с аналогичными по мощности кривошипно-шатунными двигателями бесшатунные двигатели имеют меньшие габариты, удельную массу, значительно большую литровую мощность и увеличенный моторесурс.

Ожидается, что внедрение бесшатунных двигателей в народное хозяйство позволит снизить эксплуатационные расходы, а возможность использования принципа секционной конструкции обеспечит создание двигателей различной мощности из одних и тех же деталей и узлов.

С бесшатунным механизмом могут создаваться дизели и бензиновые двигатели различного назначения, быстроходные паровые машины, поршневые компрессоры, насосы, мотогазогенераторы, комбинированные двигатели, а также различные поршневые и кулисные агрегаты.

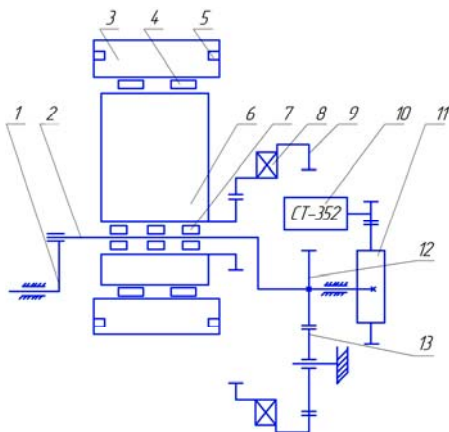


Рис. 7.1. Кинематическая схема двигателя ПКРД-1:

- 1 – кривошип; 2 – коленчатый вал; 3 – поршень;
 4 – роликовый подшипник; 5 – поршневое кольцо; 6 – эксцентрик;
 7 – роликовый подшипник; 8 – подшипник эпицикла;
 9 – эпицикл, шестерня; 10 – стартер; 11 – маховик;
 12 – шестерня коленвала; 13 – сателлиты

Оборудование и инструмент

1. Макетный образец двигателя ПКРД-1 на специальной плоской или вертикальной подставке.
2. Технический чертеж продольного разреза двигателя или его кинематическая схема.
3. Комплект инструмента для разборки и сборки силового механизма (бронзовый молоток, деревянная подставка длиной 150–180 мм, набор отверток, стальная выколотка 4 мм, набор рожковых ключей).
4. Измерительный инструмент: линейка, штангенциркуль, микрометр, технические весы.

Порядок выполнения работы

Со стороны противоположной валу редуктора на привалочной плоскости двигателя:

1. Вывернуть 4 болта с малой крышки корпуса.

2. Отвернуть 10 (9) гаек на передней крышке двигателя.
3. Применяя деревянную подставку и постукивая бронзовым молотком, снять переднюю крышку двигателя совместно с подшипником коленчатого вала.
4. Повернув вал редуктора, выставить эксцентрик и кривошип в одной плоскости.
5. Снять поршень с уплотнительными пластинами с эксцентрика. Изучить конструкцию обоймы и двух двухрядных роликовых подшипников.
6. Снять уплотнительные пластины, эспандер и треугольные опоры с канавки поршня. Разобраться со схемой уплотнения поршня. Изобразить схему расположения уплотнительных пластин.
7. Снять средний корпус двигателя с силовых шпилек. Разобраться со схемой организации продувки.
8. С помощью стальной выколотки $\varnothing 4-5$ мм и бронзового молотка выбить фиксирующий штифт с левой цапфы кривошипа коленчатого вала. Снять кривошип.
9. Разобраться со схемой передачи вращения от эксцентриков через планетарную передачу на коленчатый вал двигателя. Зарисовать схему передачи. После разборки двигателя проанализировать особенности конструкции деталей силового механизма, особенности технологии обработки для достижения требуемой точности. Сборку произвести в обратной последовательности.

Контрольные вопросы

1. Привести возможные схемы бесшатунных двигателей.
2. Описать особенности конструкции передаточного механизма и кривошипного вала.
3. Привести достоинства и недостатки схем силовых механизмов.

Лабораторная работа № 8 **ТАНКОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ 5ТДФ**

Цель работы:

1. Приобретение навыков в самостоятельной критической оценке работоспособности и перспективности рассматриваемых технических решений.
2. Знакомство с ДВС со встречно-движущимися поршнями.
3. Знакомство с организацией рабочего процесса.

Общие сведения

К середине 50-х годов как в мировом, так и в отечественном танкостроении начал формироваться новый класс машин – основные боевые танки, в которых сочеталась высокая подвижность средних танков с мощным вооружением и броневой защитой тяжелых танков. Однако в этот период не было двигателя необходимой мощности. В производстве находились только дизельные двигатели В-54, В-55 и В-12 мощностью 520–680 л.с. – надежные и доведенные силовые установки семейства все того же В-2, обладавшего далеко не безграничными возможностями форсирования. Поэтому было принято решение о создании более мощных двигателей. Помимо требований к высокой мощности перспективных танковых двигателей были заданы удельная литровая мощность, расход топлива, диапазон рабочих частоты вращения и массогабаритные показатели.

В качестве прототипа был выбран авиационный двухтактный двигатель Jumo-205 со встречно-движущимися поршнями, который был создан в Германии в начале 30-х годов двадцатого века. Характеристики двигателя Jumo 205 следующие: 6-цилиндровый, мощность 600 л.с. при 2200 мин⁻¹, ход поршня (2×160 мм), рабочий объем 16,62 л., степень сжатия – 17. На базе этого двигателя были созданы несколько партий опытных образцов, после доводки которых приступили к серийному выпуску двигателя 5ТДФ.

Принципиальная схема и рабочий цикл двигателя

Двигатель 5ТДФ представляет собой пятицилиндровый, многотопливный, двухтактный турбопоршневой двигатель со встречно-движущимися поршнями жидкостного охлаждения с внутренним смесеобразованием, прямоточной продувкой, горизонтальным расположением цилиндров и двухсторонним отбором мощности. Принципиальная схема двигателя показана на рис. 8.1.

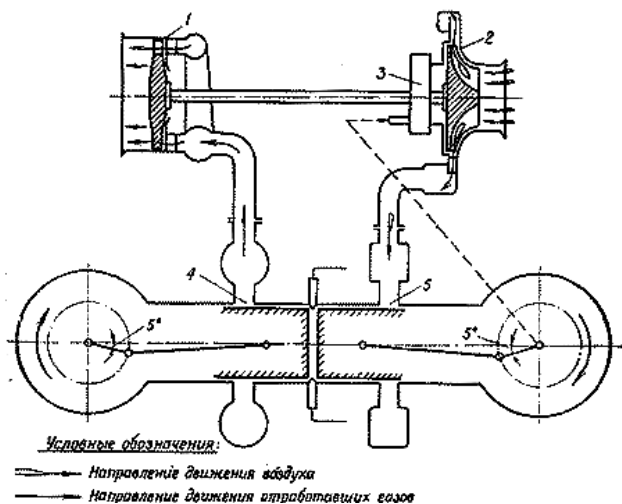


Рис. 8.1. Принципиальная схема двигателя:
1 – турбина; 2 – нагнетатель; 3 – редуктор;
4 – выпускные окна; 5 – продувочные окна

Цилиндры двигателя расположены горизонтально, и в стенках каждого из них выполнены продувочные и выпускные окна. Продувочные окна 5 служат для впуска в цилиндры свежего заряда (воздуха), который подается к ним от нагнетателя 2 через продувочный ресивер, выполненный в блоке цилиндров. Выпускные окна 4 обеспечивают выпуск из цилиндра отработавших газов, которые поступают через выпускной коллектор в газовую турбину.

В каждом цилиндре расположены два противоположно-движущихся поршня, связанных посредством шатунов со своим коленчатым валом. Поршни, помимо своего прямого назначения, управляют открытием и закрытием продувочных и выпускных окон, т. е. выполняют функции газораспределительного механизма. В связи с этим поршни, управляющие продувочными окнами, а также связанные с ними детали кривошипно-шатунного механизма, называются *впускными (продувочными)*, а поршни, управляющие выпускными окнами, – *выпускными*. Между поршнями при их максимальном сближении образуется камера сгорания.

Коленчатые валы связаны между собой шестернями главной передачи, а направление вращения их одинаковое – по часовой стрелке со стороны турбины. При этом выпускной коленчатый вал опережает впускной на 10 град. ПКВ. При таком смещении коленчатых валов максимальное сближение поршней обеспечивается при положении выпускного вала – 5 град. ПКВ за ВМТ, а впускного – 5 град. ПКВ до ВМТ.

Это положение кривошипно-шатунного механизма двигателя соответствует минимальному расстоянию между поршнями и условно называется *внутренней объемной мертвой точкой* (ВОМТ). Действительная степень сжатия, определяемая по моменту закрытия продувочных окон, составляет 16,5. Геометрическая степень сжатия равна 20,9.

Угловое смещение коленчатых валов в сочетании с несимметричным расположением продувочных и выпускных окон по длине цилиндра обеспечивает получение требуемых фаз газораспределения, при которых достигаются приемлимые очистка цилиндра от отработавших газов и наполнение его сжатым зарядом. В тоже время из-за углового смещения валов крутящий момент, снимаемый с них, неодинаков и составляет для впускного вала 30 %, а для выпускного вала 70 % от суммарного крутящего момента двигателя. Крутящий момент, развиваемый на впускном валу, передается через шестерни

главной передачи на выпускной вал и далее как суммарный снимается с двух сторон выпускного вала и передается через две зубчатые муфты на валы коробок перемены передач.

Рабочий цикл двигателя 5ТДФ иллюстрируется индикаторной диаграммой рабочего цикла (рис. 8.2) и схемой характерных положений кривошипно-шатунного механизма двигателя (рис. 8.3).

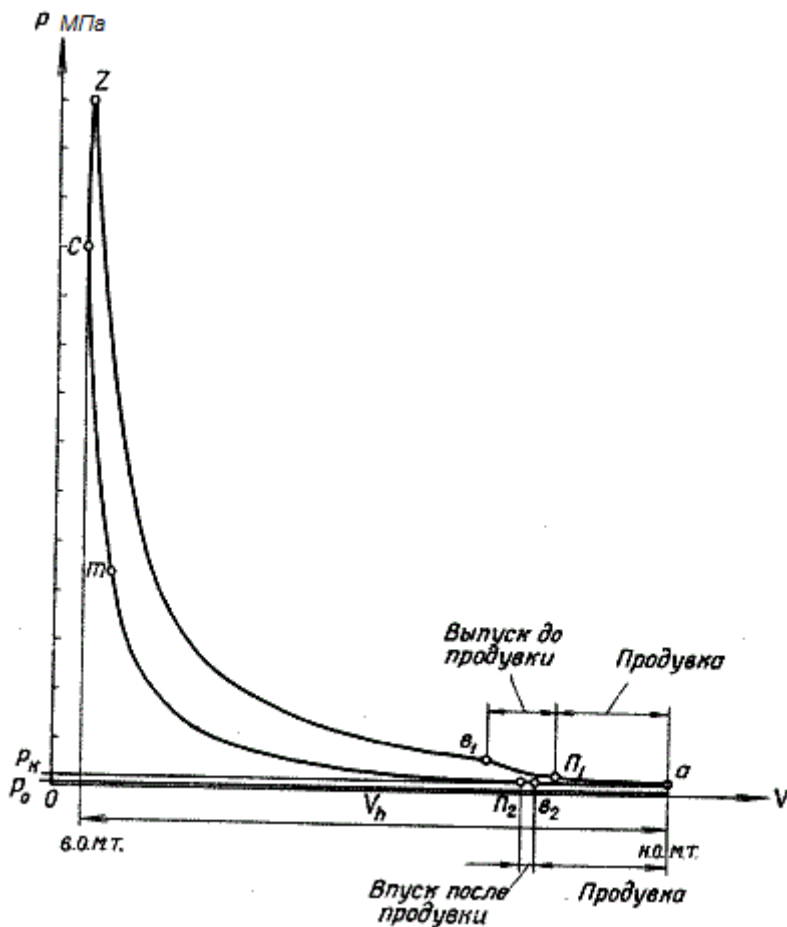


Рис. 8.2. Индикаторная диаграмма рабочего цикла

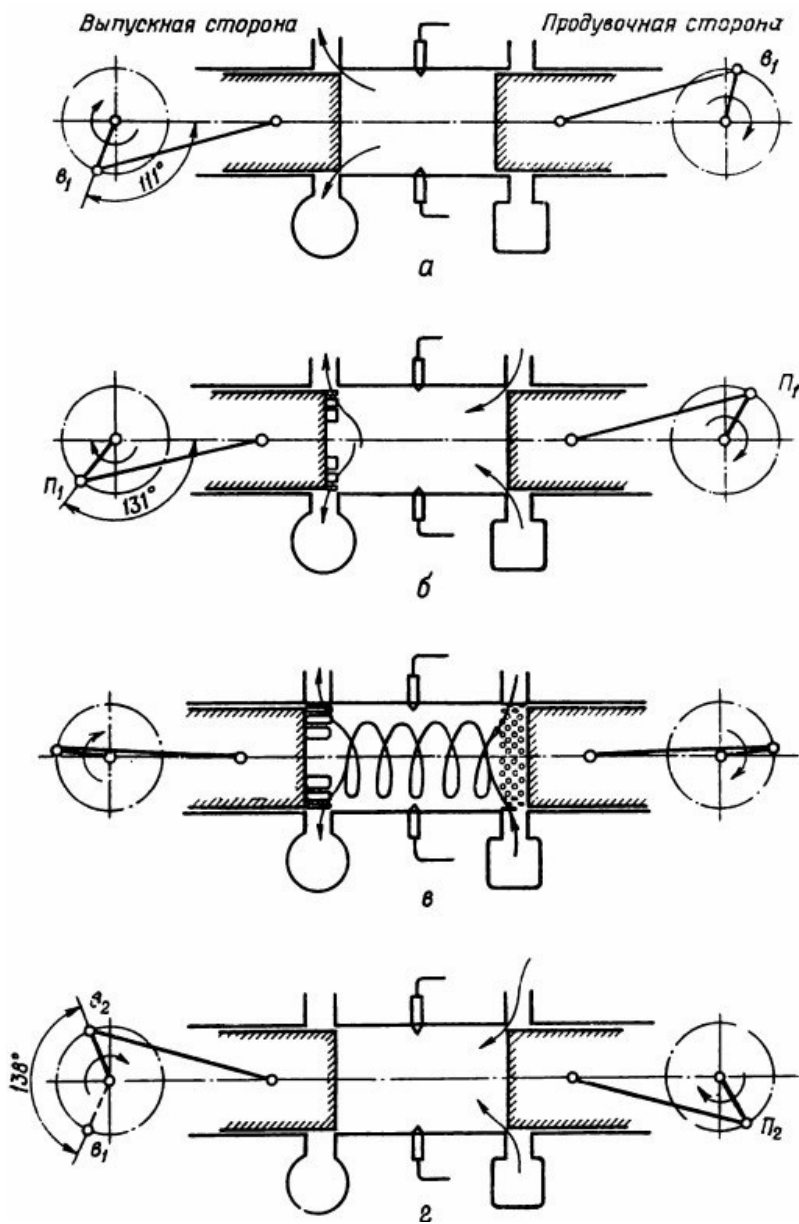


Рис. 8.3. Схема характерных положений КШМ

В двухтактных двигателях рабочий цикл осуществляется за два такта – два хода поршня или один оборот коленчатого вала. Поэтому в двухтактном двигателе число циклов, совершаемых в единицу времени, будет в два раза больше, чем в четырехтактном, что при прочих равных условиях определяет повышение мощности двигателя.

Учитывая увеличение числа рабочих циклов в два раза, следовало бы ожидать и увеличения мощности во столько же раз. В действительности мощность двухтактного двигателя увеличивается приблизительно в 1,5–1,7 раза вследствие потери части рабочего объема, ухудшения очистки и наполнения, а также затраты мощности на приведение в действие продувочного насоса.

Наиболее существенные отличия двухтактного цикла от четырехтактного связаны с организацией процессов газообмена. В четырехтактных двигателях процессы впуска и выпуска осуществляются в результате насосного действия поршня в течение двух тактов. В двухтактных двигателях время протекания этих процессов ограничено периодами открытого состояния выпускных и продувочных окон. Для того чтобы в условиях ограниченного времени и отсутствия насосного действия поршня обеспечить удовлетворительное протекание процессов газообмена, наполнение и очистка цилиндра двухтактного двигателя осуществляются воздухом, предварительно сжатым до определенного давления нагнетателем.

Фазы газораспределения выбраны таким образом, чтобы продолжительность открытия выпускных окон (выпуск) составляла 138 град. ПКВ, а продувочных – 118 град. ПКВ. Одновременное открытие продувочных и выпускных окон, соответствующее периоду продувки, равно 118 град. ПКВ. Процесс газообмена рассматриваемого двигателя можно разделить на три характерных периода. Первоначально, после открытия выпускных окон, происходит свободный выпуск ОГ (выпуск до продувки), а затем, после последующего открытия продувоч-

ных окон, происходит одновременно выпуск свежего заряда и выпуск ОГ (продувка). После закрытия выпускных окон продувочные окна остаются открытыми в течение 3 град. ПКВ. Это третий период газообмена (фаза наддува), в течение которого продолжается наполнение цилиндра свежим зарядом.

Устройство двигателя

Двигатель 5ТДФ состоит из кривошипно-шатунного механизма, механизма передач, нагнетателя, турбины, систем питания топливом и воздухом, управления, смазки, охлаждения, суфлирования и запуска. Технические характеристики двигателей семейства 5ТД представлены в табл. 8.1, а на рис. 8.4 – двигатель 5ТДФ.

Кривошипно-шатунный механизм двигателя состоит из остова, коленчатых валов, шатунов и поршней. К остову двигателя относятся блок-картер, корпус передачи, плита турбины, боковые картеры и цилиндры.

Таблица 8.1

Технические характеристики

	5ТД	5ТДФ	5ТДФМ	5ТДФМА
год	1956	1960	1972	–
Мощность, л.с.	580	700	850	1050
Диаметр цилиндра, мм	120			
Ход поршня, мм	2×120			
Число цилиндров	5			
Рабочий объем, л	13,6			
Частота вращения, мин ⁻¹	3000	2800		2850
Габариты, мм:	длина		1,47	
	ширина		955	
	высота		581	

	5ТД	5ТДФ	5ТДФМ	5ТДФМА
Габаритная мощность, л.с./м ³	729,5	895	1084	1345
Удельная масса, кг/л.с.	1,8	1,47	1,22	0,99
Литровая мощность, л.с./л	42,8	52	62,5	77,2
Удельный расход топлива, г/л.с.ч.	175	178	165	153

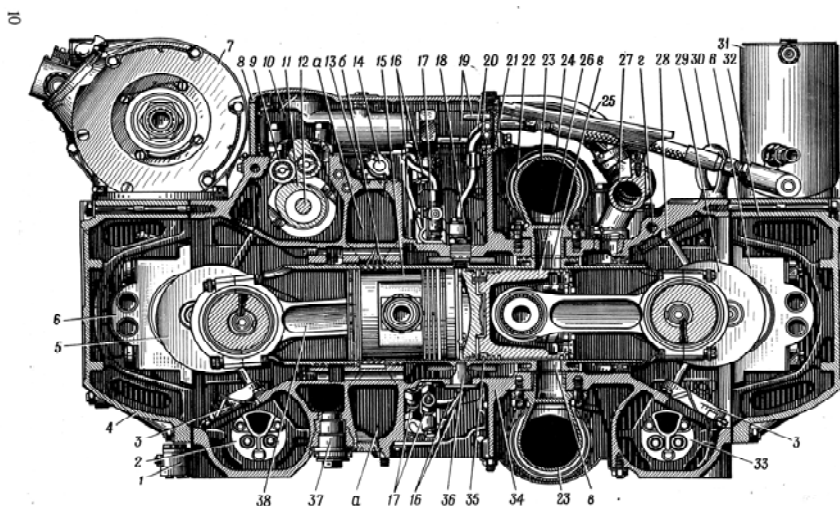


Рис. 8.4. Двигатель 5ТДФ

В блоке установлены пять цилиндров и два коленчатых вала – впускной и выпускной. В каждом из цилиндров размещено два поршня (впускной и выпускной), которые посредством шатуна связаны со своим коленчатым валом. Диаметр цилиндра и ход поршня одинаковы и равны 120 мм. Сторона двигателя, на которой расположена турбина, считается передней стороной двигателя. С этой стороны ведется счет цилиндров. Направление вращения коленчатых валов – по часовой стрелке с передней стороны двигателя. Порядок работы цилиндров 1-4-2-5-3. В блоке имеются полости для прохода охлаждаю-

щей жидкости, а также масляные и топливные каналы. В продольных каналах нижней части блока устанавливаются откачивающие масляные насосы. В цилиндрической расточке в верхней части блока на подшипниках скольжения установлен кулачковый вал привода топливных насосов высокого давления. В центральном поясе цилиндров устанавливаются форсунки системы питания двигателя топливом и клапан системы запуска двигателя сжатым воздухом.

Основным видом топлива для питания двигателя является дизельное топливо для быстроходных дизелей. Кроме того, двигатель может работать на топливе для реактивных двигателей, автомобильном бензине, а также смесях применяемых топлив в любых пропорциях.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Анализ конструкции деталей и узлов роторно-поршневого двигателя.....	5
Лабораторная работа № 2. Системы смазочная и охлаждения роторно-поршневого двигателя	10
Лабораторная работа № 3. Особенности рабочего процесса РПД	13
Лабораторная работа № 4. Показатели работы и тепловой баланс РПД	20
Лабораторная работа № 5. Двигатель Кушуля.....	22
Лабораторная работа № 6. Принцип работы двигателя Стирлинга	26
Лабораторная работа № 7. Кинематическая схема и конструкция планетарного кривошипно-роторного двигателя (ПКРД-1)	36
Лабораторная работа № 8. Танковый двигатель 5ТДФ.....	40

Учебное издание

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СХЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пособие

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

Составитель

АЛЬФЕРОВИЧ Владимир Викентьевич

Редактор *Е. О. Германович*

Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 11.03.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,91. Уч.-изд. л. 2,27. Тираж 200. Заказ 679.

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