

## Лекция № 1.

# ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ И ГИДРОДИНАМИКИ

1. Систематизация и классификация тепловых двигателей
2. Параметры состояния рабочего тела и законы идеальных газов
3. Первый закон термодинамики
4. Термодинамические процессы в идеальных газах

Исходя из современного уровня знаний можно назвать не менее десяти видов энергии, которые можно подать на вход двигателя и получить на выходе механическую энергию

В силовых установках автотракторного типа используют упругостную, химическую, электрическую и электромагнитную энергию.

- Упругостную энергию запасают в виде сжатого газа и используют, например, при пуске двигателя. Высвобождается эта энергия при снятии внешних сил с упругого тела.
- Химическая энергия запасается в виде жидкого, газообразного или твердого топлива и высвобождается при горении. Поскольку при горении выделяется теплота, двигатели, преобразующие эту тепловую энергию в механическую, называются *тепловыми* (наиболее распространены на наземном транспорте и в авиации).
- Электрическая энергия, т.е. энергия упорядоченного движения заряженных частиц, преобразуется в механическую энергию с помощью *электродвигателя*. Запасать ее можно, например, в электроаккумуляторах. Примером использования электрической энергии на транспорте является троллейбус.
- Электромагнитная энергия, т.е. энергия солнечного света, сначала преобразуется в электрическую с помощью солнечной батареи и затем через электродвигатель — в механическую.

# 1. Систематизация и классификация тепловых двигателей

- На автомобильном транспорте преимущественное распространение получили тепловые двигатели. В настоящее время в технике разработано множество двигателей различных принципиальных и конструктивных схем. Чтобы облегчить их изучение, понять общие принципы функционирования и особенности конкретного конструктивного исполнения, в инженерной практике используют такие приемы познания, как классификация и систематизация. В нашем случае *классификация* есть разделение множества двигателей на группы по принятым существенным признакам, т.е. признакам, которые прогнозируют, определяют другие признаки двигателя в данной группе. Фактически пользуясь приемом классификации, мы выделили тепловые двигатели из множества двигателей.
- Можно ли обобщить устройство тепловых двигателей, чтобы понять, почему существует такое их конструктивное разнообразие и как прогнозировать вариативные конструкторские решения? Для этого надо системно объединить известные конструктивные решения. Конструктивная структура двигателя, графическим изображением которой является чертеж, представляет каждую деталь двигателя как самостоятельное конструктивное целое

- Чертеж двигателя всегда привязан к индивидуальной конструкторской реализации и общие принципы устройства в нем разглядеть затруднительно. Поэтому для системного анализа будем использовать функциональные схемы.
- *Функциональная схема (модель) теплового двигателя* — это графическое изображение его структуры, каждая часть которой выполняет определенную функцию (т.е. имеет свое назначение), с указанием пути передачи воздействий между ними. В функциональной структуре элемент отождествляется с действием, которое он должен совершать, т.е. показывает, что надо делать, но не показывает, как надо делать. Если в разных конструкциях есть одинаковые действия элементов, значит, они для этих конструкций общие, и совокупность их позволит систематизировать схему технического объекта.
- *Систематизация* тепловых двигателей — это выявление функциональных элементов, обеспечивающих реализацию принципов работы двигателей различных конструкций, установление связей между ними и объединение их в обобщенную функциональную структуру двигателя.
- Функциональная модель теплового двигателя на метауровне (наиболее обобщенное представление) показана на рис. 1, а.

- На входе — топливо  $G_T$  и окислитель  $G_{OK}$  (обычно это кислород, содержащийся в воздухе  $G_B$ ), на выходе — вращающий момент  $M$  и угловая скорость выходного вала  $\omega$ . Показана обязательная отдача части теплоты холодному источнику  $Q_{хол}$  для удовлетворения второго закона термодинамики.

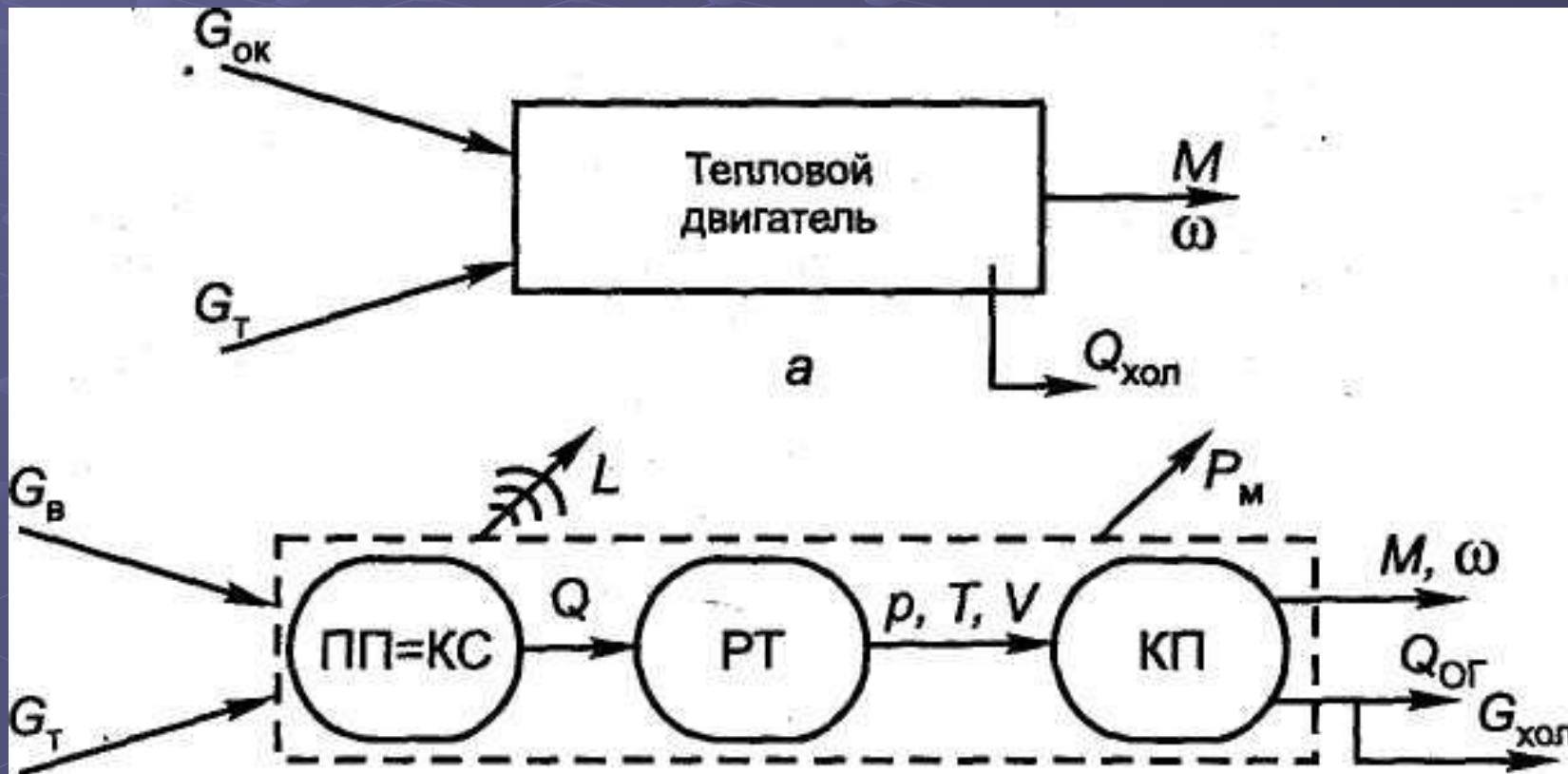
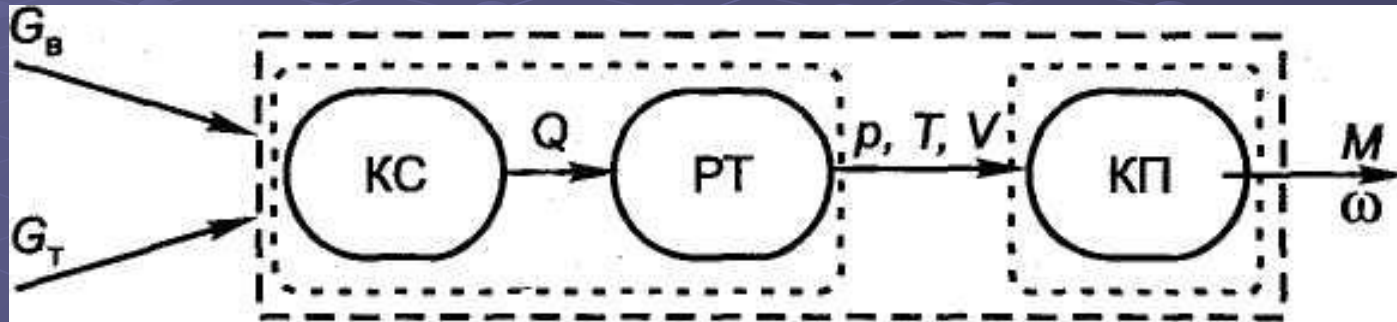


Рис. 1. Функциональная модель теплового двигателя:  
а — на метауровне; б — на макроуровне

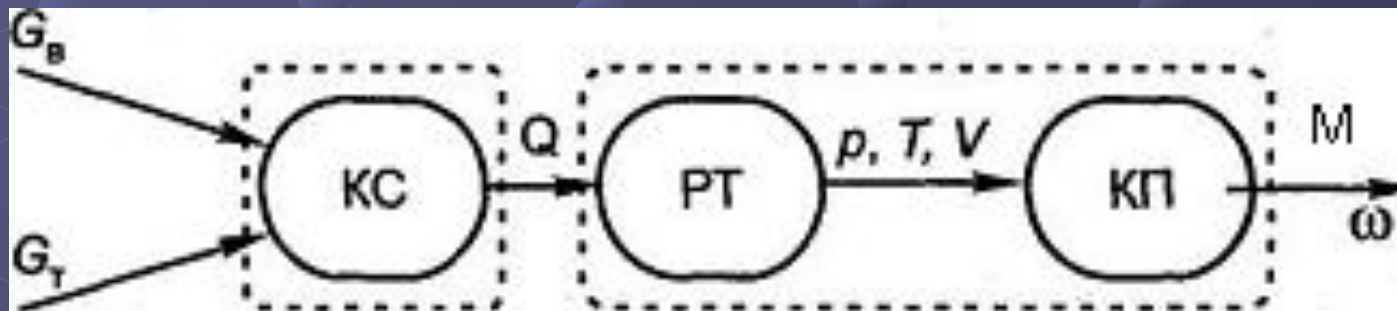


- Функциональная модель на макроуровне иллюстрирует процесс преобразования энергии в тепловом двигателе (рис. 1, б). Выделим здесь первичный преобразователь ПП, где происходит высвобождение химической энергии и превращение ее в теплоту. Теплота передается рабочему телу РТ — обычно это газообразное вещество. Термодинамические параметры рабочего тела (давление  $p$ , температура  $T$ , объем  $V$ ) с помощью конечного преобразователя КП преобразуют тепловую энергию в механическую. В дальнейшем будем обозначать ПП его единственным на сегодняшний день конструктивным решением — камерой сгорания КС, т.е. ПП = КС. На рис. 1 показаны также механические потери мощности  $P_m$  и акустическое излучение (шум)  $L$  при работе двигателя. Отдача теплоты холодному источнику происходит при охлаждении отработанных газов ОГ.
- Произведем структурирование функциональной схемы и покажем возможные решения конструктивных схем теплового двигателя. На рис. 2, а (КС + РТ) и КП выделены в самостоятельные функциональные единицы. Внутри (КС + РТ) сгорает топливо, в результате теплота выделяется и воздействует на РТ, изменяя его термодинамические параметры. Взаимодействие этих функциональных единиц осуществляется с помощью меняющихся параметров РТ. Такой двигатель называли *двигателем внутреннего сгорания (ДВС)*. Другая структуризация показана на рис. 2, б — КС выделяется во внешний элемент, РТ и КП объединяются в другом конструктивном узле. Это схема *двигателя внешнего сгорания*, предложенная Р. Стирлингом (1816). По схеме двигателя внешнего сгорания работают паровые машины.

- Совокупность ПП, РТ и КП назовем функциональным модулем с именем «Тепловой преобразователь энергии» (ФМ «ТПРЭ»). Данный функциональный модуль представляет собой графическую интерпретацию понятия «двигатель» и показывает схему преобразования химической энергии топлива в механическую с помощью соответствующих функциональных элементов.



а



Внешняя камера  
сгорания

Рабочий цилиндр

Рис. 2. Структурирование функциональной модели теплового двигателя  
а – двигатель внутреннего сгорания; б – двигатель внешнего сгорания.

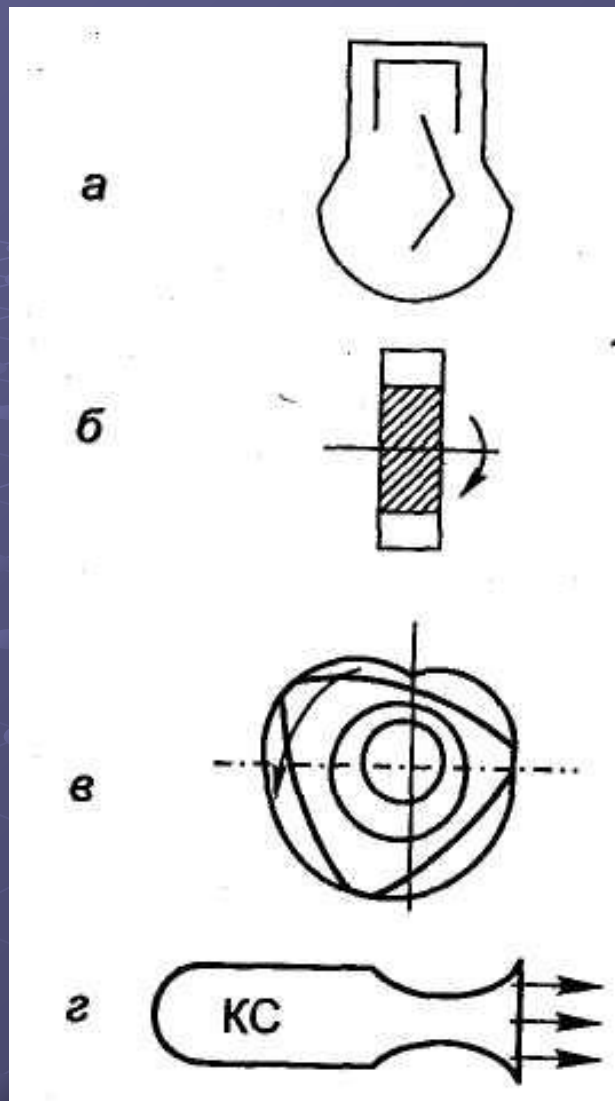


Рис. 3. Конструктивная реализация КП двигателя внутреннего сгорания: а – в виде КШМ; б – в виде ГТ; в – в виде ротора; г – в виде реактивного сопла



- Для того чтобы функциональный модуль «Тепловой преобразователь энергии» (т.е. собственно двигатель) выполнял свое назначение по генерированию механической энергии и обеспечивал на всех режимах работы оптимальные мощностные, экономические и экологические показатели, его надо оснастить дополнительными функциональными устройствами. ФМ «ТПРЭ» и эти дополнительные функциональные устройства по сути уже составляют силовую установку. Функциональная схема силовой установки на расширенном макроуровне, представляющая бензиновый карбюраторный двигатель, дана на рис. 4. Представленные на этом рисунке функциональные элементы по значимости влияния на выполнение технической функции двигателя разделены на главные (ГФЭ) и вспомогательные (ВФЭ) функциональные элементы.
- ГФЭ обеспечивают принципиальное выполнение технической функции двигателя, т.е. непосредственное выполнение физических операций, с помощью которых реализуется потребность в механической энергии. ВФЭ не влияют на принципы выполнения технической функции двигателя, но обеспечивают более эффективное его функционирование.

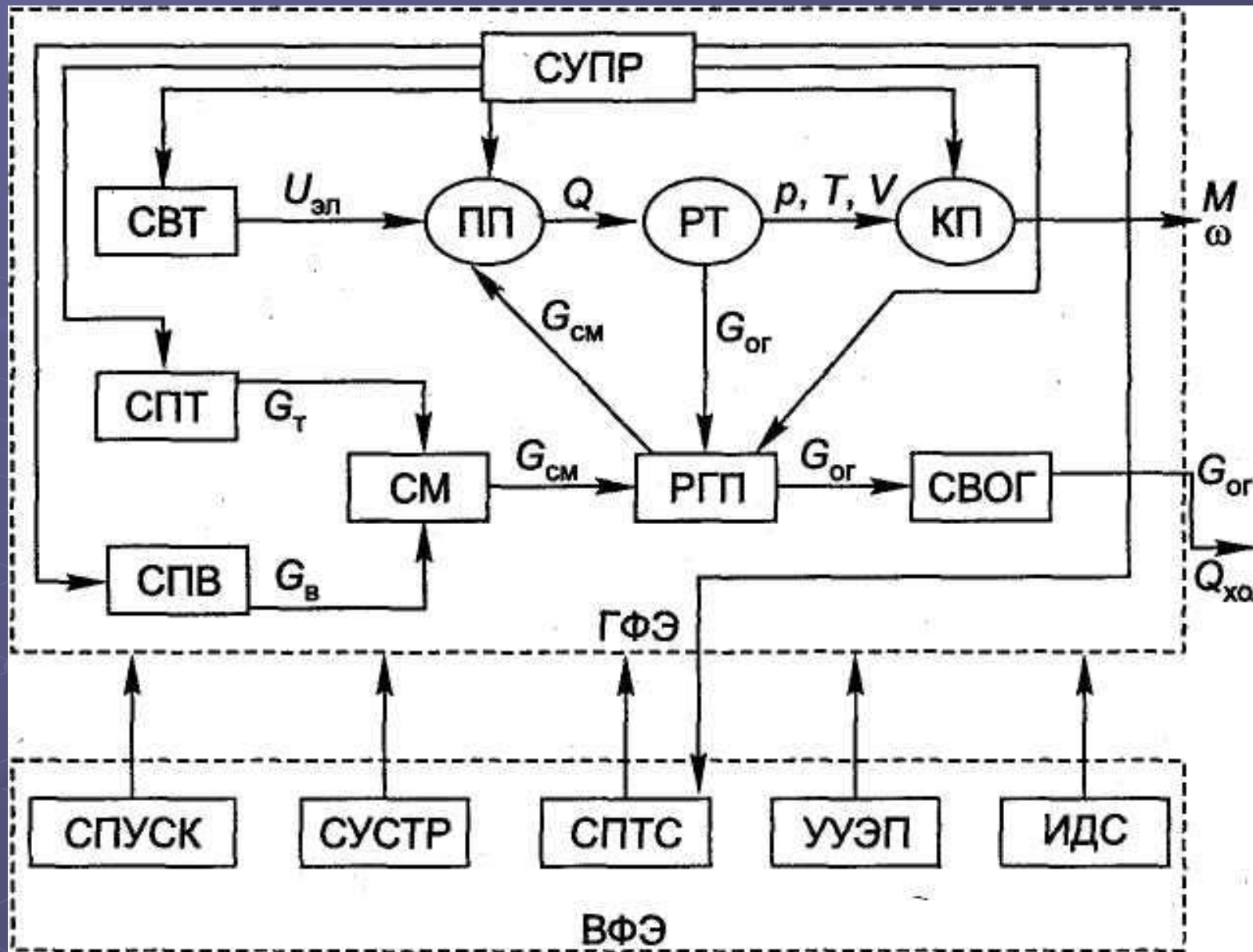


Рис. 4. Функциональная схема силовой установки на расширенном макроуровне (бензиновый карбюраторный двигатель)

- Приведенная на рисунке схема показывает, что силовая установка представляет систему функциональных элементов, взаимодействующих между собой. Синхронизация работы функциональных элементов и обеспечение качественных показателей характеристик двигателя связаны с законами управления функционированием двигателя. Поэтому обобщенная функциональная схема теплового двигателя должна включать элементы, выполняющие функции управления. Эти элементы составляют систему управления (СУПР). Управляющие воздействия показаны на рис. 4 стрелками, проведенными от СУПР к соответствующим функциональным элементам. В современном бензиновом двигателе система управления выполняет как главные функции — своевременную подачу напряжения  $U_{эл}$  на свечу зажигания в камере сгорания, своевременное открытие и закрытие клапанов механизма распределения газовых потоков (РГП), так и некоторые вспомогательные функции. К последним относятся регулирование температурного состояния двигателя, управление длиной впускного трубопровода и рециркуляцией отработанных газов, регулирование степени сжатия или отключения некоторых цилиндров кривошипно-шатунного механизма.
- Функциональные элементы двигателя могут быть реализованы в виде различных конструктивных деталей (табл. 1).

## Соответствие функциональных элементов двигателя их конструктивным реализациям

Функциональные элементы	Варианты конструктивной реализации
ГФЭ:	
Первичный преобразователь (ПП)	Камера сгорания
Система воспламенения топлива (СВТ)	Система батарейного зажигания Система зажигания с магнето
Рабочее тело (РТ)	Газообразные продукты сгорания
Конечный преобразователь (КП)	КШМ Роторно-поршневой механизм
Система подачи воздуха (СПВ)	Воздушный фильтр, впускной коллектор, впускной клапан
Система подачи топлива (СПТ)	Топливный бак, бензонасос, фильтры, топливопроводы
Смеситель (СМ)	Карбюратор
Распределитель газовых потоков (РГП)	Клапанный газораспределительный механизм (ГРМ) Золотниковый ГРМ
Система выпуска отработанных газов (СВОГ)	Выпускной клапан, выпускной коллектор, глушитель



## Продолжение таблицы 1

Система управления (СУПР)	Привод дроссельной заслонки, ограничитель частоты вращения коленчатого вала, регулятор угла опережения зажигания,, термостат, управление клапанами ГРМ Блоки микропроцессорного управления
ВФЭ:	
Система уменьшения сил трения (СУСТР)	Моторное масло, маслонасос, фильтр, маслопроводы, материалы в парах трения Керамический двигатель
Система поддержания теплового состояния (СПТС)	Охлаждающая жидкость, насос, рубашка охлаждения, радиатор, термостат, подогреватель
Система пуска (СПУСК)	Электростартер Заводная ручка (механический стартер)
Устройство улучшения экологических показателей (УУЭП)	Каталитический и термический нейтрализаторы, сажевый фильтр, плазменный реактор Антишумовая капсула
Информационно-диагностическая система (ИДС)	Система встроенных датчиков для контроля параметров двигателя, щиток приборов оперативной и диагностической информации

- Поршневые двигатели внутреннего сгорания можно классифицировать на группы по различным признакам.
- **По назначению:**
- стационарные двигатели, применяемые на электростанциях, буровых установках, нефте- и газоперекачивающих станциях и т.п.;
- транспортные, используемые на автомобилях, тракторах и других мобильных машинах.
- **По виду применяемого топлива:**
- двигатели, работающие на жидком топливе (бензин, дизельное топливо);
- двигатели, работающие на газообразном топливе (естественном, генераторном газе и др.).
- **По способу осуществления рабочего цикла:**
- двухтактные двигатели, в которых рабочий цикл в одном цилиндре осуществляется за два хода поршня, т.е. за один оборот коленчатого вала;
- четырехтактные, в которых рабочий цикл в одном цилиндре совершается за четыре хода поршня, т.е. за два оборота коленчатого вала.

- **По способу воспламенения рабочей смеси:**
- с принудительным зажиганием электрической искрой (бензиновые карбюраторные двигатели, бензиновые двигатели с впрыском топлива, газовые двигатели);
- с самовоспламенением топлива от сжатия свежего заряда (дизельные двигатели);
- с форкамерно-факельным зажиганием, когда смесь в специальной дополнительной камере сгорания воспламеняется искрой, а в основной камере — от факела пламени из дополнительной камеры (бензиновые карбюраторные двигатели).
- **По способу смесеобразования:**
- с внешним смесеобразованием (газовые двигатели, бензиновые карбюраторные и бензиновые с впрыском топлива во впускной трубопровод);
- с внутренним смесеобразованием (дизели и двигатели с впрыском бензина в цилиндры).
- **По способу наполнения цилиндров свежим зарядом:**
- двигатели с естественным всасыванием заряда за счет разрежения в цилиндре при такте наполнения;
- двигатели с наддувом, когда свежий заряд поступает в цилиндры под давлением, превышающим давление окружающей среды.

- **По конструктивным признакам:**
- одно- и многоцилиндровые;
- с вертикальным, горизонтальным, V- и звездообразным расположением блоков цилиндров;
- одно- и двухвальные.
- **По способу охлаждения цилиндров:**
- с жидкостным охлаждением;
- с воздушным охлаждением.

## **2. Параметры состояния рабочего тела и законы идеальных газов**

- **Технической термодинамикой** называется наука, изучающая свойства тепловой энергии и законы взаимного превращения тепловой и механической энергии. Она является основой теории двигателей внутреннего сгорания.
- Процессы взаимного преобразования теплоты и работы в различных тепловых машинах осуществляются с помощью вещества, называемого *рабочим телом*. Например, в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и в газотурбинных установках рабочим телом является газ (воздух).



- Физическое состояние рабочего тела характеризуется величинами, которые называют **термодинамическими параметрами состояния**. В качестве основных термодинамических параметров принимают удельный объем, абсолютное давление и абсолютную температуру.
- **Удельный объем** ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) представляет собой объем единицы массы вещества:

$$v = \frac{V}{m}$$

- где  $V$  — объем вещества,  $\text{м}^3$ ;
- $m$  — масса вещества, кг.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}$$

- **Плотность** ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) есть масса единицы объема, обратная удельному объему:
- **Давление** газа обуславливается совокупностью ударов беспорядочно движущихся молекул о стенки сосуда, в котором заключен газ, и представляет собой силу, действующую на единицу площади поверхности стенки:

$$p = \frac{P}{a},$$

где  $P$  — сила, Н;

$a$  — площадь поверхности, м<sup>2</sup>.

За единицу давления в Международной системе единиц (СИ) принят паскаль — давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>. Применяют также укрупненные единицы: килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа):

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10^{-3} \text{ кПа} = 10^{-6} \text{ МПа}$$

В технике в настоящее время продолжают применять также систему единиц МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда), в которой за единицу давления принимается 1 кгс/м<sup>2</sup>. Используют также внесистемные единицы — техническую атмосферу и бар:

$$1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2; \quad 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 1,02 \text{ атм};$$

$$1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Па}.$$

Различают абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление. На практике за начало отсчета обычно принимают атмосферное (барометрическое) давление.

- *Абсолютным давлением* называется давление газов и жидкостей в закрытых объемах. Если абсолютное давление больше атмосферного, то разность между ними характеризует *избыточное (манометрическое) давление*:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}$$

- Если абсолютное давление меньше атмосферного, то разность между ними называется *разрежением, или вакуумом*:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}$$

- Вышеприведенные формулы показывают, что при неизменном состоянии газа в сосуде постоянным остается лишь значение  $p_{\text{абс}}$ , а  $p_{\text{изб}}$  и  $p_{\text{вак}}$  изменяются при изменении  $p_{\text{атм}}$ . Поэтому параметром состояния газа служит только абсолютное давление, которое и входит во все термодинамические зависимости.
- **Температура** представляет собой степень нагретости рабочего тела. Ее измеряют по международной стоградусной шкале Цельсия с обозначением  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), или абсолютной шкале Кельвина с обозначением  $T$  (K).

Соотношение между температурой в кельвинах и в градусах Цельсия следующее:

$$T = t + 273,16$$

**Абсолютная температура**, измеряемая в Кельвинах, является параметром состояния.

При изучении свойств рабочего тела в технической термодинамике вводят понятие *идеального газа*. При построении модели идеального газа придерживаются следующих положений:

пренебрегают силами межмолекулярного взаимодействия; рассматривают молекулы газа как абсолютно упругие частицы, объем которых бесконечно мал по сравнению с объемом газа.

В технике в качестве рабочих тел применяют реальные газы и их смеси —  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO_3$ , перегретый водяной пар, атмосферный воздух и др. Реальный газ отличается от идеального тем, что у него молекулы имеют конечный объем и между ними действуют силы сцепления.



Газообразные продукты сгорания топлива, являясь рабочим телом в ДВС, по своим свойствам близки к идеальным газам, учитывая ту область состояний, в которой протекает процесс в двигателе. Поэтому в тепловых расчетах допустимо считать их идеальными газами.

