

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Калининградский государственный технический университет»

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

**В.А. Щеглов**, канд. техн. наук, профессор

## **СИЛОВЫЕ АГРЕГАТЫ**

Учебное пособие  
по дисциплинам «Силовые агрегаты»  
и «Рабочие процессы, конструкция  
и основы расчета энергетических установок  
и транспортно-технологического оборудования»  
направления подготовки 23.03.03  
«Эксплуатация транспортно-технологических  
машин и комплексов»  
для студентов всех форм обучения

БГАРФ

Калининград  
Издательство БГАРФ  
2019

УДК 621.43.044(075)

**Щеглов, В.А. Силовые агрегаты:** учеб. пособие / В.А. Щеглов. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2018. – 101 с.

Учебное пособие по дисциплинам «Силовые агрегаты» и «Рабочие процессы, конструкция и основы расчета энергетических установок и транспортно-технологического оборудования» направления подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» предназначено для студентов всех форм обучения.

Ил. 37, табл. 1, библиогр. – 9 назв.

Учебное пособие рассмотрено и одобрено кафедрой «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей» БГАРФ, протокол № 5 от 12.12.2018 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.

**Рецензенты:** **Викулов С.И.**, канд. техн. наук, доцент Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота;  
**Гусак А.Л.**, канд. техн. наук, доцент кафедры № 24, ФГКОУ ВО «Калининградский пограничный институт Федеральной службы безопасности Российской Федерации»

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Техническая термодинамика .....	5
1.1. Основные понятия и определения .....	5
1.2. Цикл Карно .....	8
1.3. Теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС).....	9
1.4. Теоретические циклы газотурбинных установок.....	17
2. Рабочие процессы ДВС .....	20
2.1. Области применения и классификация двигателей .....	20
2.2. Рабочие процессы четырехтактного бензинового двигателя.....	22
2.3. Рабочие процессы четырехтактного дизеля.....	24
2.4. Характеристики.....	26
3. Конструкция двигателей .....	30
3.1. Конструкции систем питания двигателей с впрыском бензина .....	30
3.2. Конструкции систем питания дизелей .....	46
3.3. Топлива и их свойства.....	57
4. Системы зажигания .....	62
4.1. Принцип действия контактной системы зажигания .....	63
4.2. Принцип действия контактно-транзисторной системы....	65
4.3. Принцип действия бесконтактной системы зажигания....	67
4.4. Устройство приборов системы зажигания.....	67
4.5. Система статического синхронного зажигания с двухвыводными катушками зажигания.....	82
4.6. Устройство системы КНС (катушка на свече).....	88
5. Перспективы развития двигателей .....	91
5.1. Силовая установка на топливно-водородных элементах .....	91
5.2. Гибридные двигатели .....	95
5.3. КПД циклов Отто и Миллера и их термодинамический анализ .....	99
Заключение.....	100
Список использованной литературы.....	101

## ВВЕДЕНИЕ

Основой автотранспортной энергетики в ближайшем будущем останутся двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые после почти столетнего развития достигли высокого совершенства. Факторами, влияющими на конструкцию ДВС, являются необходимость увеличения удельной мощности, повышение надежности и возможность использования двигателя в различных условиях эксплуатации при минимальных расходах топлива, стоимости и затратах материалов.

Это обстоятельство заставит если не в настоящее время, то в ближайшем будущем сделать выбор между альтернативными видами топлива. Этот процесс уже начался. Таковы главные технико-экономические факторы, которые определяют современный ресурс двигателей.

Практика показывает, что резервы их дальнейшего совершенствования далеко не исчерпаны. В учебнике отражены последние достижения и перспективные направления в развитии теории рабочих процессов, конструкции двигателей. Должное внимание уделено использованию альтернативных видов топлива. Отмечается, что многие достижения связаны с использованием микропроцессорной техники для управления системами двигателей.

Это, в свою очередь, обусловило прогресс в организации рабочих процессов и конструкции систем двигателей, рассчитанных на управление микропроцессором: топливоподача и искровое зажигание смеси, фазы газораспределения, управляемые системы впуска и наддува, управляемая интенсивность вихревого движения заряда в цилиндре, нейтрализация отработавших газов и т. п. Продолжаются активные поиски работоспособных конструкций, позволяющих осуществлять управляемое изменение рабочего объема цилиндров, степени сжатия, утилизации теплоты.

Глубокое понимание принципов работы объектов транспортной энергетики, строгая научная обоснованность путей и методов дальнейшего совершенствования двигателей – главные требования к специалисту будущего.

Из всего комплекса проблем выделим, на наш взгляд, главные: 1) улучшение топливной экономичности; 2) совершенствование экологических характеристик; 3) повышение надежности энергетических установок.

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к энергоустановке: безопасность выполнения транспортных услуг,

обеспечение транспортного комфорта и сохранности грузов при транспортировке, безвредность воздействия на окружающую среду, сохранение природных (топливно-энергетических, материальных, трудовых) ресурсов. Обязательным остается и требование транспортной эффективности, которому должна соответствовать любая, в том числе и экологически чистая, энергоустановка.

Для энергоустановок легковых автотранспортных средств наибольшую значимость имеют высокая удельная мощность, минимальные выбросы оксидов азота, полиароматических углеводородов, допустимый уровень звука и минимальный удельный расход топлива.

Взаимодействие автомобильной энергоустановки с окружающей средой происходит посредством потоков вещества, энергии и энтропии на всем протяжении жизненного цикла установки, что предопределяет роль термодинамики – науки об энергии, ее видах и свойствах, закономерностях преобразования энергии в физических и химических процессах.

Слово термодинамика происходит от греческого *therme* – тепло и *dynamis* – сила. Техническая термодинамика рассматривает процессы взаимного преобразования теплоты и работы. Ее теоретические построения опираются на два закона природы:

- первое начало (закон) термодинамики – как приложение к тепловым процессам закона о сохранении и преобразования энергии;
- второе начало термодинамики определяет направление протекающих в природе тепловых процессов.

Основная задача технической термодинамики - разработка теоретических основ функционирования тепловых двигателей, отыскание наиболее рациональных способов взаимного преобразования теплоты и работы.

## **1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

### **1.1. Основные понятия и определения**

Процессы преобразования одного вида энергии в другой реализуются в конкретных тепловых машинах. Например, в двигателях внутреннего сгорания тепло преобразуется в механическую работу, в холодильниках – механическая работа в тепло.

## ***Принцип действия двигателя, основные термины и определения***

При вращении коленчатого вала поршень перемещается в цилиндре прямолинейно вверх и вниз. При движении поршня вниз в цилиндре создается разрежение, за счет которого через открытый впускной клапан цилиндр заполняется горючей смесью (в дизеле – воздухом). Поршень перемещается вверх, смесь (воздух в дизеле) сжимается и воспламеняется от свечи зажигания (в дизеле – от сжатия). Топливо в дизеле впрыскивается в сжатый и горячий воздух в самом конце такта сжатия.

Горючая смесь сгорает, выделяется большое количество тепла, вследствие чего газы, образовавшиеся при сгорании, нагреваются, и давление их сильно возрастает. Под действием давления газов поршень перемещается вниз, совершая полезную работу. При обратном ходе поршня вверх отработавшие газы удаляются из цилиндра через открытый выпускной клапан.

За один оборот коленчатого вала (кривошипа) поршень делает два хода: вниз и вверх. Изменение направления движения поршня происходит в нижней и верхней мертвых точках. Полный рабочий цикл четырехтактного двигателя происходит за два оборота коленчатого вала, поршень при этом совершает четыре хода (ход вниз – впуск свежего заряда, ход вверх – сжатие, ход вниз – рабочий ход, ход вверх – выпуск отработавших газов).

**Верхняя мертвая точка (ВМТ)** – положение поршня, наиболее удаленное от оси коленчатого вала.

**Нижняя мертвая точка (НМТ)** – положение поршня, наименее удаленное от оси коленчатого вала.

**Ход поршня  $S$**  – расстояние, пройденное поршнем от ВМТ до НМТ. По величине ход поршня равен двум радиусам кривошипа.

**Объем камеры сгорания  $V_c$**  – объем в цилиндре над поршнем при его положении в ВМТ.

**Рабочий объем цилиндра  $V_s$**  – объем, освобождаемый поршнем при его перемещении из ВМТ в НМТ.

**Полный объем цилиндра  $V_t = V_s + V_c$**  – сумма объема камеры сгорания и рабочего объема.

**Рабочий объем, или литраж двигателя  $V_{st}$** , есть сумма рабочих объемов всех цилиндров двигателя, выраженная в литрах.

**Степень сжатия двигателя  $\varepsilon$**  – отношение полного объема цилиндра к объему камеры сгорания  $\varepsilon = (V_s + V_c) / V_c$ .

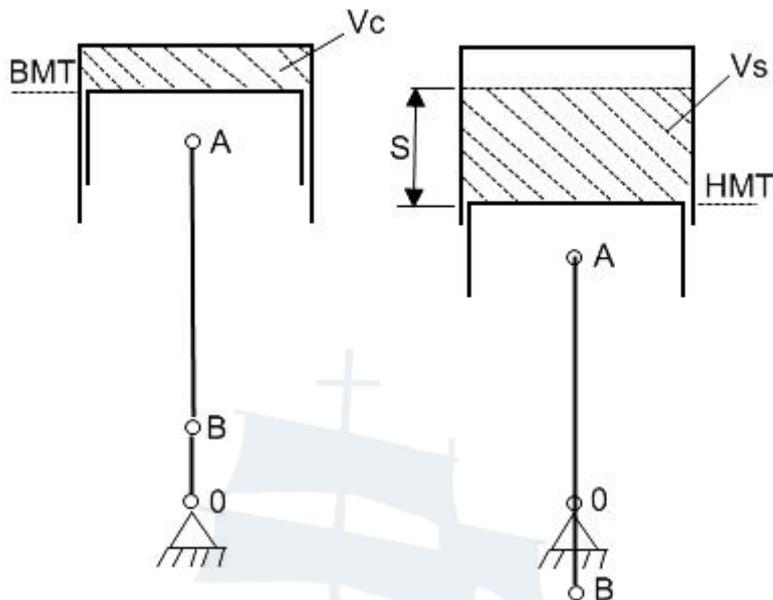


Рис. 1.1. Основные характеристики цилиндра

Рассматривая работу ДВС, видим, что преобразование теплоты, полученной в процессе сжигания топлива, в механическую работу реализуется с помощью воздуха и газов – продуктов сгорания топлива.

Тело (воздух, газ, продукты сгорания), с помощью которого осуществляются процессы преобразования теплоты в работу или наоборот, называется рабочим телом.

Совокупность тел, способных обмениваться между собой и с окружающей средой энергией и веществом, называется термодинамической системой.

Состояние системы в текущий момент времени определяется совокупностью свойств системы (совокупностью свойств рабочего тела). Физические величины, которые составляют эту совокупность, называются параметрами состояния системы. Физическими параметрами состояния рабочего тела являются удельный объем, давление и температура.

Изменение состояния термодинамической системы, характеризующееся изменением хотя бы одного из параметров состояния, называется термодинамическим процессом.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое тепловая машина?
2. Какую функцию выполняет в тепловой машине рабочее тело?

## 1.2. Цикл Карно

Французский инженер Сади Карно в 1824 году опубликовал трактат «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», в которой обосновал цикл идеального теплового двигателя поршневого типа с максимально возможным термическим КПД. Трактат Карно явился импульсом в создании поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Прямой обратимый цикл Карно (рис. 1.2, а) состоит из двух изотерм 1-а и 2-в и двух адиабат а-2 и в-1. Расширение идеального газа реализуется по процессам 1-а-2; сжатие – по процессам 2-в-1. В изотермическом процессе 1-а к газу подводится теплота  $q_1$ , в изотермическом процессе 2-в от газа отводится тепло  $q_2$ .

Термический КПД цикла Карно выразим через параметры рабочего тела. В общем виде КПД можно записать по уравнению:

$$\eta_{тк} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Подвод и отвод тепла производится по изотермам по уравнению:

$$q = \int_{S_1}^{S_2} T ds = T(S_2 - S_1),$$

следовательно:

$$q_1 = T_1(S_2 - S_1);$$

$$q_2 = T_2(S_2 - S_1).$$

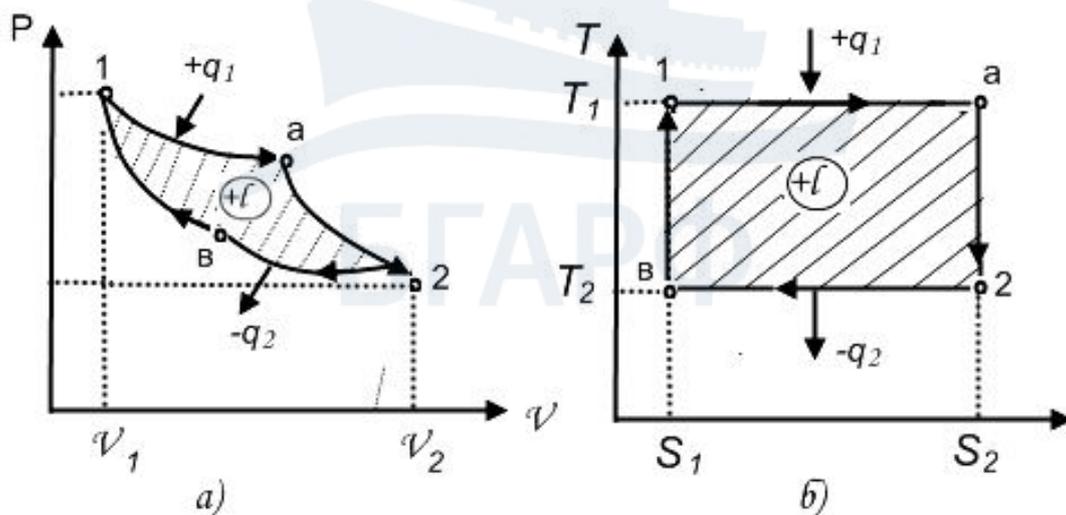


Рис. 1.2. Прямой обратимый цикл Карно в координатах PV(а) и TS(б)

Термодинамический КПД цикла Карно определится:

$$\eta_{tk} = 1 - \frac{T_2(S_2 - S_1)}{T_1(S_2 - S_1)} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (1.1)$$

Величина теплоты  $q_2$  для цикла Карно равна площади 2-в-1- $\mathcal{V}'_1$ - $\mathcal{V}'_2$ -2, а для произвольного цикла  $q_{2np}$  – 2-b-1-c-d-2 (рис. 1.14, а). Очевидно, что  $q_2$  Карно меньше  $q_{2np}$  произвольного цикла. Величина теплоты  $q_1$  для цикла Карно равна площади 1-a-2- $\mathcal{V}'_2$ - $\mathcal{V}'_1$ -1, для произвольного цикла – 1-a-2-d-c-1. Очевидно, что  $q_1$  Карно больше  $q_{1np}$ . В целом отношение  $\frac{q_2}{q_1}$  Карно  $< \frac{q_2}{q_1}$  пр, следовательно:

$$\eta_{tk} \text{ Карно} > \eta_{tk} \text{ пр.} \quad (1.2)$$

Из уравнения (1.1) следует, что эффективность прямого обратимого цикла Карно определяется разностью температур рабочего тела, между которыми реализован цикл.

Термический КПД любого цикла представляется как

$$\eta_t = \frac{l_v}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}. \quad (1.3)$$

Из (1.3) следует вывод: термический КПД цикла Карно тем больше, чем меньше отвод тепла (теплопотери).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

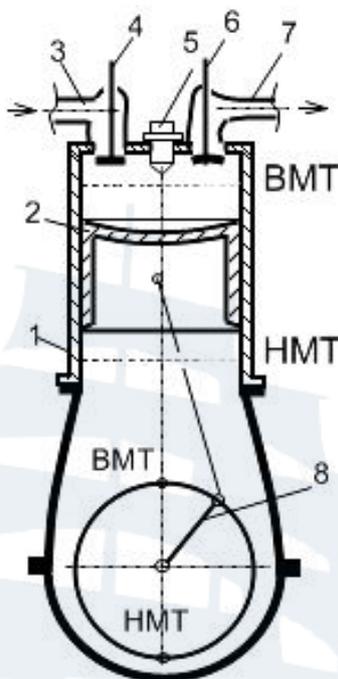
1. Из каких процессов состоит цикл Карно?
2. Запишите КПД прямого цикла Карно.
3. В чем достоинство цикла Карно?

## 1.3. Теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

### 1.3.1. Принцип действия поршневого ДВС

Двигателями внутреннего сгорания называют тепловые двигатели, рабочим телом которых являются газообразные продукты сгорания топлива, при этом сгорание топлива осуществляется непосредственно внутри двигателя. ДВС имеют поршневую или роторную кинематическую схему.

Поршневые ДВС разделяются на двигатели с воспламенением топлива от искры (бензиновые) и двигатели с самовоспламенением топлива (дизели).



*Рис. 1.3. Схема поршневого дизеля*

Рассмотрим рабочий процесс ДВС с самовоспламенением топлива. Кинематическая схема двигателя показана на рис. 1.3.

При вращении коленчатого вала 8, поршень 2 совершает в цилиндре 1 возвратно-поступательные движения между верхней и нижней мертвыми точками (ВМТ и НМТ). Пусть поршень движется вниз от ВМТ, при открытом впускном клапане 4 в цилиндр из впускного трубопровода 3 поступает воздух. Наполнение цилиндра заканчивается после прихода поршня в НМТ и закрытия впускного клапана.

При последующем движении поршня вверх от НМТ к ВМТ осуществляется сжатие воздуха в цилиндре, сопровождаемое возрастанием давления и температуры.

При подходе поршня к ВМТ в цилиндр через форсунку 5 впрыскивается топливо, которое, самовоспламеняясь, сгорает, выделяя большое количество тепла, в результате растет давление и температура продуктов сгорания в цилиндре. При нисходящем движении поршня происходит догорание топлива и расширение рабочего тела – выполняется полезная работа. Вблизи НМТ открывается выпускной клапан 6, давление в цилиндре падает и при движении поршня вверх, отработавшие газы через выпускной трубопровод 7 удаляются из цилиндра.

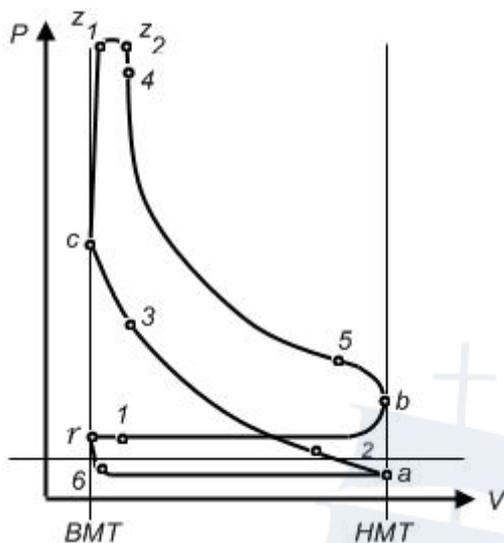


Рис. 1.4. Индикаторная диаграмма дизеля

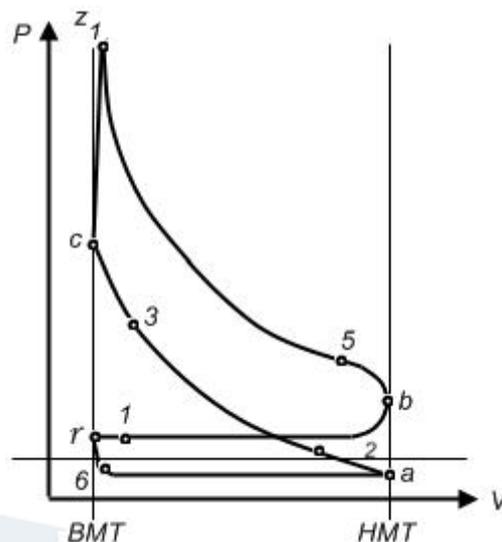


Рис. 1.5. Индикаторная диаграмма бензинового ДВС

При достижении поршнем ВМТ все повторяется.

Таким образом, действительный цикл ДВС с самовоспламенением топлива (рис. 1.4, 1.5) составляют процессы наполнения  $r-a$ , сжатия  $a-c$ , сгорания топлива  $c-z$ , расширения  $z-b$  и выпуска газа  $b-r$ . В термодинамике изучаются идеализированные циклы ДВС. При идеализации действительных циклов принимаются допущения:

- идеальный цикл ДВС считают состоящим из обратимых изопараметрических процессов (например, изобара, изохора и т.д.);
- процесс сгорания топлива заменяют процессами подвода теплоты от гипотетического источника;
- процессы сжатия и расширения считают адиабатными;
- процессы наполнения и выпуска не рассматривают, заменяя их процессом отвода теплоты в окружающую среду;
- принимают, что рабочим телом является идеальный газ в количестве 1 кг.

На основе перечисленных допущений, действительный цикл ДВС с самовоспламенением топлива (рис. 1.5) от сжатия можно заменить, представленным, например, на рис. 1.6 в координатах  $PV$  и  $TS$ .

Идеальные термодинамические циклы ДВС характеризуются рядом параметров:

- степенью сжатия  $\varepsilon = \frac{V_t}{V_c}$ ;
- степенью повышения давления при подводе теплоты  $\lambda = \frac{P_z}{P_c}$ ;

- степенью предварительного расширения  $\rho = \frac{v_{z''}}{v_z}$ ;
- термическим КПД  $\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$ ;
- средним давлением цикла  $p_t = \frac{l}{(v_a - v_c)}$ .

### 1.3.2. Цикл с изохорно-изобарным подводом теплоты

Цикл со смешанным (изохорно-изобарным) подводом теплоты изображен в координатах  $PV$  на рис. 1.5, а, в координатах  $TS$  на рис. 1.5, б. Подвод теплоты  $q_1 = q_1^v + q_1^p$  реализуется частично по изохоре  $cz$  и частично по изобаре  $zz''$ . Отводится теплота по изохоре  $ba$ .

В соответствии с определением термического КПД запишем:

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1^v + q_1^p}. \quad (1.4)$$

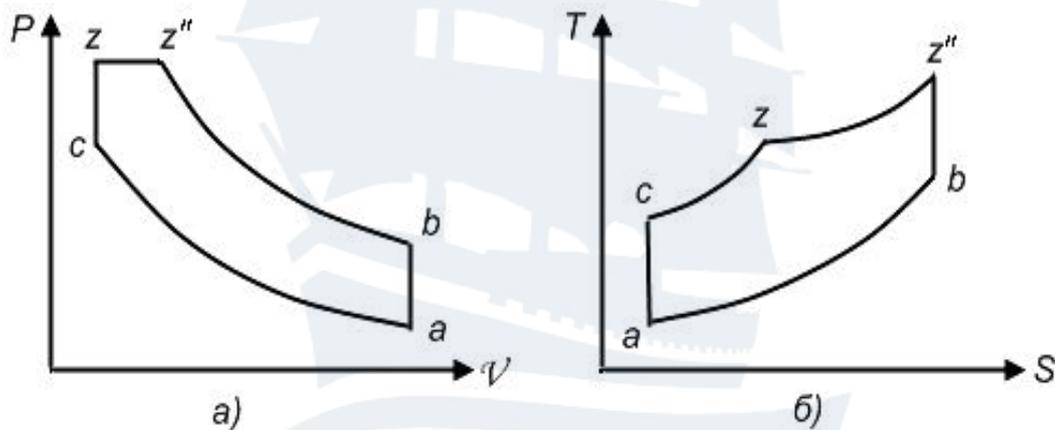


Рис. 1.6. Идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорно-изобарным подводом тепла в координатах  $PV$  (а) и координатах  $TS$  (б)

Количество подведенной и отведенной теплоты в цикле можно посчитать:

$$q_1^v = c_v(T_y - T_c); \quad q_1^p = c_p(T_z - T_y);$$

$$|q_2| = c_v(T_B - T_a).$$

Подставим значения температур  $T_c, T_y, T_z, T_e$  в уравнение (1.4):

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)}. \quad (1.5)$$

Анализ уравнения (1.5) показывает, что термический КПД цикла со смешанным подводом тепла наиболее значимо определяется степенью сжатия. С увеличением  $\varepsilon$  значение  $\eta_t$  возрастает. В меньшей степени наблюдается возрастание  $\eta_t$  с увеличением  $\lambda$  и с уменьшением  $\rho$ . Среднее давление цикла запишется:

$$p_t = \frac{P_a \varepsilon}{(\varepsilon - 1)(k - 1)} \left[ \varepsilon^{k-1} (\lambda - 1) + k\lambda \varepsilon^{k-1} (\rho - 1) - \lambda \rho^k + 1 \right]. \quad (1.6)$$

### 1.3.3. Цикл с изохорным подводом теплоты

Цикл с изохорным подводом теплоты есть идеализация рабочего цикла бензиновых двигателей. В этом цикле подвод теплоты осуществляется при постоянном объеме, а степень предварительного расширения  $\rho = 1$  (рис. 1.7).

Используем уравнения (1.5) и (1.6). Подставим в знаменатель  $\rho = 1$ , получим зависимость термического КПД и среднего давления цикла с изохорным подводом теплоты:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}; \quad p_t = \frac{P_a \varepsilon}{(\varepsilon - 1)(k - 1)} (\varepsilon^{k-1} - 1)(\lambda - 1). \quad (1.7)$$

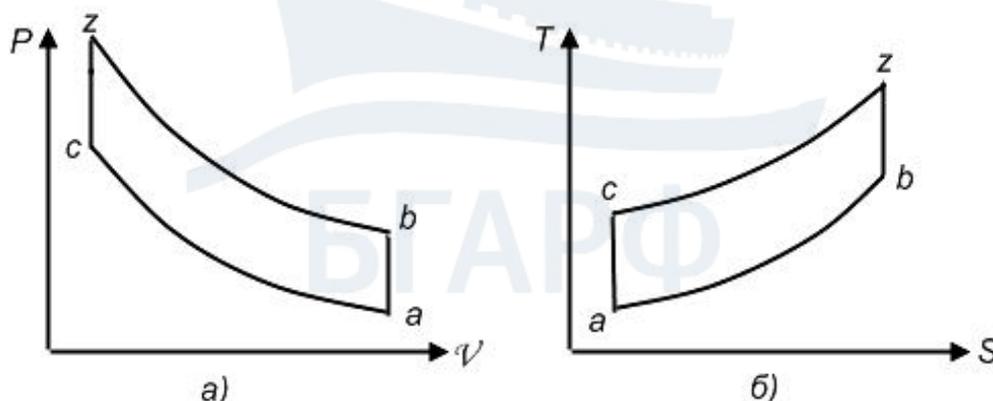


Рис. 1.7. Идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным подводом теплоты в координатах  $PV$  (а) и координатах  $TS$  (б)

Анализ уравнения (1.7) показывает, что термический КПД этого цикла зависит только от степени сжатия.

### 1.3.4. Цикл с изобарным подводом теплоты

Цикл с изобарным подводом тепла (рис. 1.8) называют циклом Дизеля.

В первых дизелях топливо впрыскивалось в цилиндр и распылялось сжатым воздухом. Процесс подачи топлива, а следовательно, и его сгорания растягивался во времени и осуществлялся при постоянном давлении газа. Для цикла с изобарным подводом теплоты  $\lambda = 1$ .

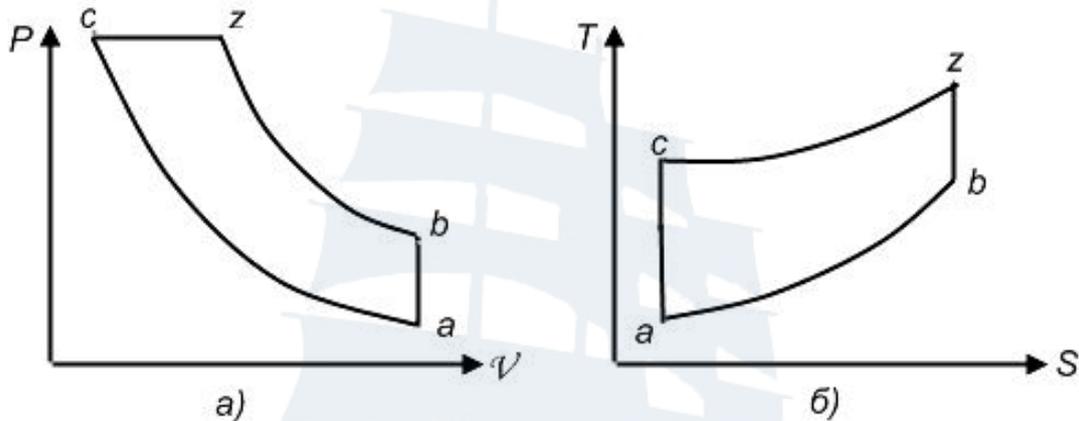


Рис. 1.8. Идеальный термодинамический цикл изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля) в координатах  $PV$  (а) и координатах  $TS$  (б)

Используем уравнения (1.5) и (1.6) для получения зависимости  $\eta_t$  и  $p_t$  от параметров цикла. Подставив  $\lambda = 1$ , получим:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}; \quad (1.7)$$

$$p_t = \frac{P_a \varepsilon}{(\varepsilon - 1)(k - 1)} (k \varepsilon^{k-1} (\rho - 1) - \rho^k + 1). \quad (1.8)$$

Анализ уравнения (1.79) показывает, что с увеличением  $\varepsilon$  и уменьшением  $\rho$ , величина термического КПД цикла с изобарным подводом тепла возрастает.

### 1.3.5. Цикл дизеля с газотурбинным наддувом

Наиболее значимым методом повышения мощности двигателей (форсировки) является наддув, т. е. подача свежего заряда в цилиндр под давлением. Анализ характеристического уравнения состояния

идеального газа (1.9) показывает, что увеличение давления свежего заряда в цилиндре при неизменной температуре пропорционально увеличению его массы:

$$M = \frac{pV}{RT}. \quad (1.9)$$

Увеличение массы свежего заряда (для дизеля – воздушного заряда) позволяет сжигать больше топлива за цикл, т. е. увеличивать мощность двигателя.

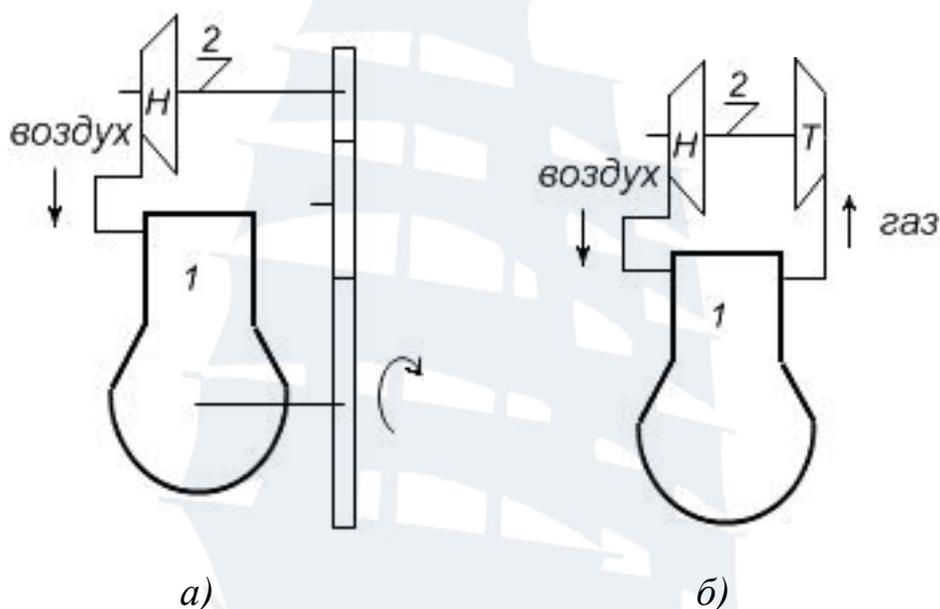


Рис. 1.9. Схема привода центробежных нагнетателей при наддуве двигателей:

*а – приводной нагнетатель; б – газотурбинный нагнетатель*

Для наддува двигателей используют нагнетатели с приводом от коленчатого вала (рис. 1.9, а) или от газовой турбины (рис. 1.9, б), что позволяет в целом повысить эффективность цикла. Поэтому газотурбинный наддув (ГТН) является предпочтительным.

*Работа дизеля с ГТН (рис. 1.9, б).* На такте выпуска отработавшие газы дизеля по трубопроводу поступают через сопловой аппарат на рабочие лопатки турбины *T*, приводят ротор турбины во вращение и отводятся в атмосферу по выпускному трубопроводу. Газовая турбина вращает нагнетатель *H*, который осуществляет сжатие воздуха и подачу его по впускному трубопроводу в цилиндр дизеля на такте впуска.

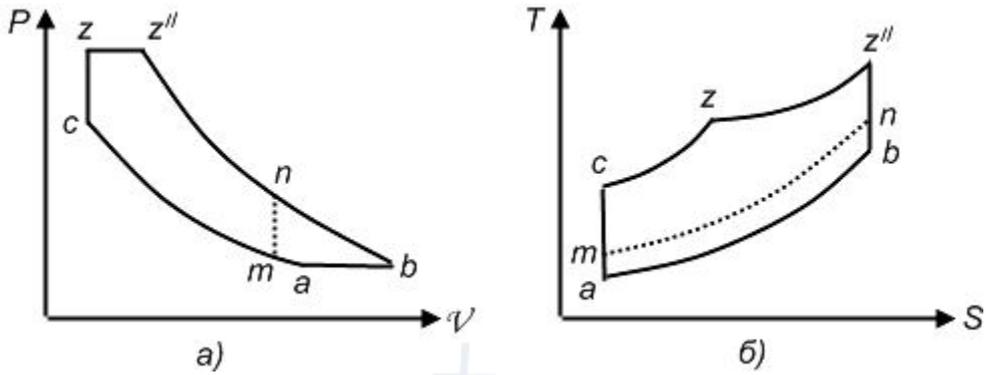


Рис. 1.10. Идеальный термодинамический цикл дизеля с ГТН в координатах  $PV$  (а) и координатах  $TS$  (б)

Цикл дизеля с ГТН показан в координатах  $PV$  на (рис. 1.10, а) и в координатах  $TS$  на (рис. 1.10, б). Подвод теплоты реализуется в процессах  $cz$  и  $zz''$ , а отвод теплоты в процессе  $ba$  при постоянном давлении.

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2^p|}{q_1^v + q_1^p}.$$

Конечное уравнение КПД можно записать:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} k \frac{\lambda \rho^{\frac{1}{k}} - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)}, \quad (1.10)$$

где  $\varepsilon = \frac{v_a}{v_c}$  – степень сжатия.

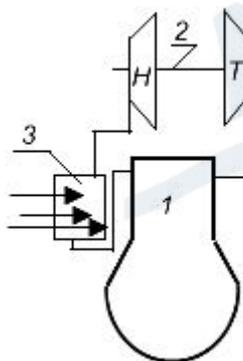


Рис. 1.11. Схема дизеля с ГТН и охлаждением надувочного воздуха: 1 – дизель; 2 – ГТН; 3 – воздушный охладитель

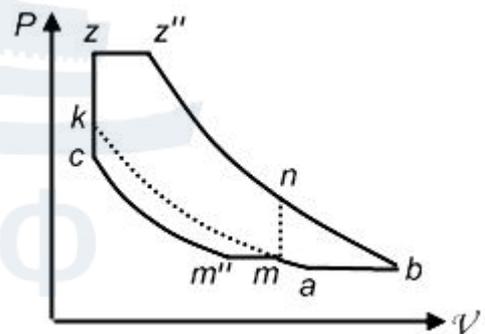


Рис. 1.12. Идеальный термодинамический цикл дизеля с ГТН и охлаждением надувочного воздуха

С целью снижения теплонапряженности и дальнейшей форсировки дизеля, наддувочный воздух после турбокомпрессора охлаждается (рис. 1.11).

Особенности термодинамического цикла дизеля с ГТН и охлаждением наддувочного воздуха показаны на (рис. 1.12). Для установки в целом цикл представляется полем  $a-m-m''-c-k-z-z''-n-b-a$ . Процесс охлаждения воздуха после ГТН при условии  $P = const$  представлен отрезком  $mm''$ .

Из рис. 1.12 видно, что при условии сохранения теплонапряженности дизеля на неизменном уровне охлаждение наддувочного воздуха позволяет увеличить работу цикла пропорционально площадям  $a-b-n-m-m''-a$  и  $a-m-n-b-a$ , т. е. увеличить мощность дизеля.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип действия поршневого двигателя.
2. Какими параметрами характеризуется цикл поршневого двигателя?
3. Представьте цикл ДВС с изохорным подводом тепла в  $PV$  и  $TS$  диаграммах.
4. По какому циклу работает бензиновый и дизельный двигатель?
5. Что дает газотурбинный наддув дизельного двигателя?
6. С какой целью охлаждается воздух после ГТН?

### 1.4. Теоретические циклы газотурбинных установок

#### 1.4.1. Принцип работы газотурбинной установки

Газотурбинные установки (ГТУ) находят применение в автомобилях, для силовой установки которых определяющими показателями являются малый вес и габариты, хорошая уравновешенность.

Принципиальная схема ГТУ показана на рис. 1.13. В структуру простейшей ГТУ входит компрессор, камера сгорания и турбина.

Рассмотрим работу газотурбинной установки (рис. 1.13). В состав ее входят компрессор 1, камера сгорания 2, турбина 3.

Компрессор засасывает воздух из атмосферы, сжимает его и подает в камеру сгорания. В камере сгорания в поток воздуха подается топливо. При сгорании топлива температура в камере сгорания возрастает, и газы (продукты сгорания топлива и избыточный воздух) поступают к турбине. В проточной части турбины на лопатках газы,

расширяясь, совершают механическую работу, вращая ротор турбины, а следовательно, вал всей установки. От вала турбины приводится в действие компрессор и приводной агрегат (например, генератор). Отработавший в турбине газ отводится в атмосферу.

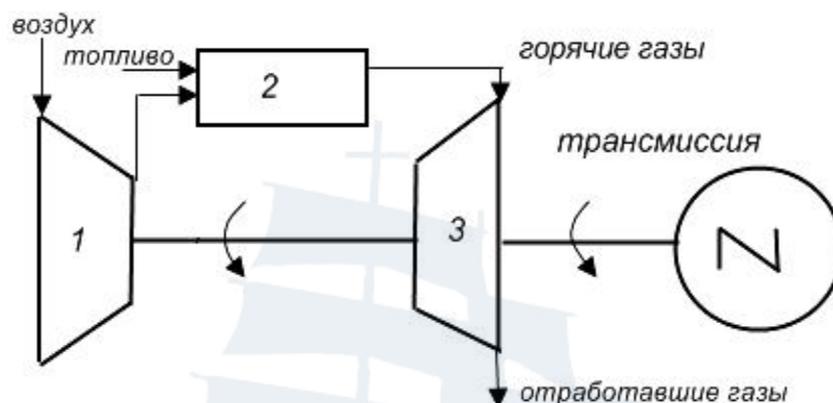


Рис. 1.13. Принципиальная схема одновальной газотурбинной установки

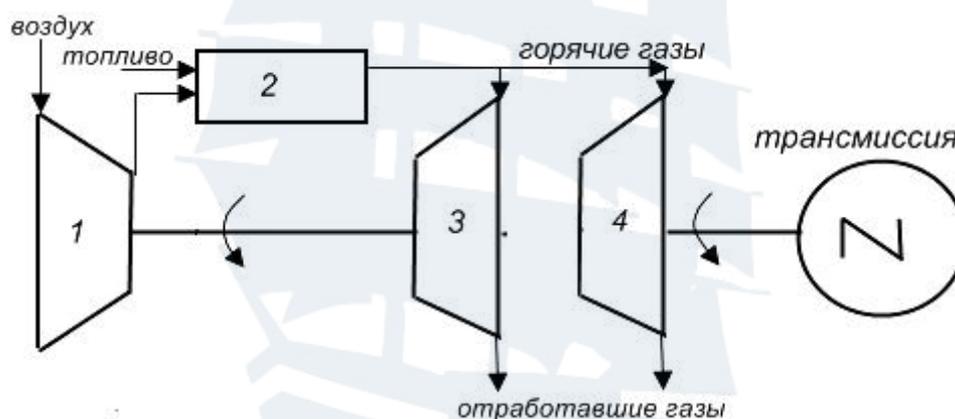


Рис. 1.14. Принципиальная схема двухвальной газотурбинной установки

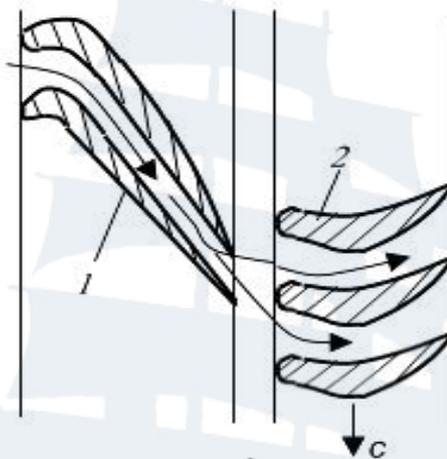
Рассматривая работу газотурбинной установки (ГТУ) видим, что преобразование теплоты, полученной в процессе сжигания топлива, в механическую работу реализуется с помощью воздуха и газов – продуктов сгорания топлива.

В качестве компрессоров в ГТУ используются осевые и центробежные компрессоры.

Одновальные ГТУ используют для привода стационарных двигателей. На транспортных машинах более выгодно использовать двухвальные ГТУ (рис. 1.14). Такая конструкция имеет дополнительную турбину 3 для привода компрессора. В связи с этим двухвальные ГТУ имеют высокий момент на низких частотах, что соответствует

потребностям автомобиля. Например, при увеличении нагрузки на двигатель его частота падает, следовательно, в одновальной ГТУ падает количество подаваемого воздуха. Но при увеличении нагрузки подается больше топлива, а следовательно, требуется больше воздуха. Этого недостатка лишены двухвальные ГТУ.

Перед рабочими лопатками установлен неподвижный сопловой аппарат в виде лопаток, образующих систему сопловых каналов 1. Схема аппарата и рабочих лопаток турбины показана на рис. 1.15.



*Рис. 1.15. Проточная часть газовой турбины:  
1 – лопатки соплового аппарата; 2 – рабочие лопатки колеса*

Рабочее тело (газ) поступает к сопловому аппарату, где в результате расширения газа происходит преобразование внутренней энергии газа в кинетическую энергию потока. Поток поступает на рабочие лопатки 2, воздействует на них, заставляя вращаться.

На выходе из каналов рабочих лопаток скорость потока значительно меньше, т. е. кинетическая энергия потока преобразуется в работу вращения ротора (вала) турбины. Процесс расширения газа в сопловом аппарате рассматривается как адиабатный.

Сгорание топлива в камере сгорания реализуется при постоянном давлении с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 3-5$ . Большой коэффициент избытка воздуха устанавливается из-за необходимости ограничения температуры рабочих газов, поступающих к турбине в пределах  $650-750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что определяется жаропрочностью лопаток соплового аппарата турбины.

Турбина служит для преобразования внутренней энергии газа в работу и является главным агрегатом в структуре ГТУ.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова структура простейшей ГТУ?
2. Представьте в  $p-v$  диаграмме цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты.
3. Что дает регенерация теплоты отработавших газов в ГТУ?

## 2. РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ДВС

### 2.1. Области применения и классификация двигателей

Устройства, преобразующие какой-либо вид энергии в механическую работу, называются *двигателями*.

Машины, трансформирующие тепловую энергию в механическую работу, носят название *тепловых двигателей* (ТД).

Тепловые двигатели являются основным типом энергетической установки на всех видах транспорта (железнодорожный, речной, морской, автомобильный и воздушный), на сельскохозяйственных и дорожно-строительных машинах. Различают ТД *стационарные* и *транспортные*.

Для *транспортных двигателей* характерна работа при изменении в широких пределах скоростного и нагрузочного режимов, а также необходимость сохранения работоспособности при изменениях положения двигателя в пространстве. К ним предъявляются повышенные требования по уменьшению габаритов и массы.

По способу подвода теплоты к рабочему телу (РТ) (РТ – это субстанция, с помощью которой происходит преобразование тепловой энергии в механическую работу – упрощенно говоря – это горючая смесь) различают *двигатели с внешним подводом теплоты* (ДВПТ) и *двигатели внутреннего сгорания* (ДВС).

Для ДВПТ характерны следующие особенности:

- теплота к РТ подводится вне рабочего цилиндра двигателя (обычно в теплообменнике);
- РТ не обновляется и циркулирует в различных агрегатных состояниях по замкнутому контуру;
- работа совершается в турбине или в расширительном цилиндре.

Классические примеры этого типа ТД – паровой двигатель, двигатель Стирлинга.

ДВС по сравнению с ДВПТ имеют, как правило, существенно меньшие габариты и массу на единицу производимой мощности, вследствие чего они являются в настоящее время основным типом транспортных энергетических установок.

По конструкции элементов, с помощью которых тепловая энергия сгорающего топлива преобразуется в механическую работу, различают: *поршневые* ДВС с возвратно-поступательно движущимися поршнями (ПДВС); двигатели с вращающимися поршнями, или *роторно-поршневые* ДВС (РПД); роторно-лопастные ДВС (РЛД) *газотурбинные* двигатели (ГТД); *реактивные* двигатели (РД).

Из-за неудовлетворительной топливной экономичности РПД, ГТД и РД не нашли широкого применения в наземной транспортной технике. Здесь в качестве энергетических установок используются главным образом ПДВС.

По способу воспламенения смеси различают ДВС с *принудительным* (преимущественно искровым) *зажиганием* и *дизели*, работающие с воспламенением от сжатия.

В двигателях с искровым зажиганием используются два вида топлива: жидкость – преимущественно бензин (*бензиновые* двигатели) и газ (*газовые* двигатели).

Двигатели с искровым зажиганием могут быть *бензиновые* и *газовые*, в которых топливовоздушная смесь, поступающая в цилиндры, подготавливается вне их, т. е. в автономном устройстве, называемом карбюратором или смесителем. По другому признаку классификации эти двигатели относят к ДВС с внешним смесеобразованием. Более широко распространены двигатели с впрыском топлива непосредственно в цилиндр или во впускной трубопровод (обычно на впускной клапан).

Дизель относится к двигателям с внутренним смесеобразованием. Следует отметить и еще один признак, отличающий двигатель с искровым зажиганием от дизеля, – способ регулирования мощности.

Двигатели с искровым зажиганием (*бензиновые*) относятся к ДВС с количественным регулированием, мощность которых регулируется на большей части режимов изменением количества подаваемой в цилиндры топливовоздушной смеси (ТВС).

Дизели являются двигателями с качественным регулированием, так как в них для изменения мощности в практически неизменное количество воздушного заряда впрыскивается различное количество топлива, что резко меняет состав ТВС, т. е. относительное содержание в ней топлива и воздуха.

Это обстоятельство существенно влияет на характер физико-химических процессов, обеспечивающих преобразование энергии топлива в механическую работу.

По способу осуществления цикла различают двухтактные и четырехтактные ДВС. Из определения такта работы как совокупности процессов, протекающих в цилиндре двигателя при перемещении поршня между верхней и нижней мертвыми точками (ВМТ и НМТ), следует, что в четырехтактном ДВС рабочие процессы совершаются за два оборота коленчатого вала, в двухтактном – за один.

Характер процессов, формирующих рабочий цикл ДВС, зависит от принципов организации газообмена, способа организации смесеобразования (внешнее или внутреннее) и воспламенения (от искры или от сжатия).

## 2.2. Рабочие процессы четырехтактного бензинового двигателя

Рабочий процесс двигателя принято анализировать по индикаторной диаграмме, представляющей собой зависимость давления  $p$  в цилиндре двигателя от переменного объема надпоршневого пространства  $V$ .

Индикаторная диаграмма четырехтактного бензинового двигателя приведена на рис. 2.1.

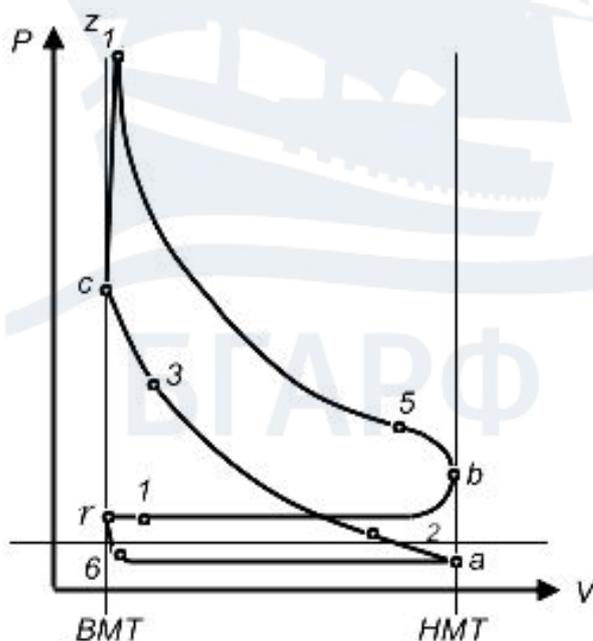


Рис. 2.1. Индикаторная диаграмма бензинового двигателя

**Первый такт** (впуск) реализуется при повороте кривошипа от 0 до  $180^\circ$ , чему соответствует увеличение объема надпоршневого пространства от  $V_c$  (объем камеры сгорания) при положении поршня в верхней мертвой точке (ВМТ) до  $V_t = V_c + V_s$  (полный объем цилиндра) при положении поршня в нижней мертвой точке (НМТ). Объем  $V_s$  называют *рабочим объемом цилиндра*.

В действительном цикле понятия «такт» и «процесс» не совпадают. Для лучшей организации процессов газообмена клапаны открываются до начала соответствующего такта и закрываются по его окончании.

Перед началом впуска в объеме камеры сгорания  $V_c$  находятся продукты сгорания, оставшиеся от предыдущего цикла, которые называются *остаточными газами*. Заполнение цилиндра свежим зарядом (линия  $r_a$  на диаграмме) происходит из-за разрежения в нем, создаваемого движущимся в сторону НМТ поршнем.

Давление  $p_a$  в конце такта впуска (точка  $a$ ) определяется гидравлическими потерями во впускном тракте, величина которых зависит от скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя (от скорости перемещения ТВС по впускному тракту и от степени открытия дроссельной заслонки). На режиме номинальной мощности (дроссель открыт полностью, и частота вращения коленчатого вала равна номинальной)  $p_a = (0,8 - 0,9)p_0$ .

На температуру  $T_a$  влияют теплообмен свежего заряда с элементами двигателя, формирующими впускную систему и камеру сгорания, и его охлаждение за счет затрат теплоты на испарение топлива, для компенсации которых в бензиновом двигателе осуществляется специальный подогрев ТВС во впускном трубопроводе, ОГ или горячей жидкостью из системы охлаждения. Кроме того, температура свежего заряда увеличивается вследствие перемешивания его с горячими остаточными газами.

На номинальном режиме в бензиновом двигателе превалирует подогрев свежего заряда и  $T_a = 320 - 350$  К.

**Второй такт работы двигателя** (сжатие) осуществляется при повороте кривошипа на угол  $\varphi = 180 - 360^\circ$  (линия  $ac$  на диаграмме). На расчетные значения параметров рабочего тела в конце сжатия (точка  $c$ ) в основном влияют их начальные значения ( $p_a, T_a$ ) и степень сжатия  $\varepsilon$ , которая равна отношению объемов  $V_a$  и  $V_c$ , т. е.  $\varepsilon = V_c / V_t$ . При значениях  $\varepsilon$ , характерных для современных бензиновых двигателей ( $\varepsilon = 6,5 - 10$ ), давление и температура принимают значения:

$$p_c = 0,9 - 1,5 \text{ МПа}, \quad T_c = 550 - 750 \text{ К}.$$

При реализации действительного цикла давление в конце такта сжатия, т. е. при положении поршня в ВМТ,

$$p'_c > p_c; p'_c = (1,15 - 1,25)p_c,$$

что является следствием повышения давления в результате начавшегося процесса сгорания (точка  $f$  – момент искрового разряда в свече зажигания). Угловой интервал от момента подачи искры до прихода поршня в ВМТ называется *углом опережения зажигания*.

**Третий такт** ( $\varphi = 360-540^\circ$ ) – такт расширения. Во время этого такта работы двигателя происходят сгорание основной доли поданного в цилиндр топлива, расширение рабочего тела и осуществляется полезная работа.

Вблизи ВМТ при повороте кривошипа на угол  $\varphi_z = 10-15^\circ$  давление в цилиндре достигает максимума  $p_z = 3,5-6,5$  МПа и соответственно возрастает температура рабочего тела до  $T_z = 2400-2800$  К. Отношение  $\lambda = p_z / p_c$  называют *степенью повышения давления*. Для современных бензиновых двигателей  $\lambda = 3,6-4,2$ . По завершении такта расширения рабочее тело (РТ) имеет расчетные значения давления и температуры, соответственно  $p_B = 0,35-0,5$  Мпа;  $T_B = 1400-1700$  К.

Следует заметить, что в действительном цикле процесс расширения заканчивается раньше, чем поршень приходит в НМТ, из-за раннего начала открытия выпускного клапана.

**Четвертый такт** ( $\varphi = 540-720^\circ$ ) – такт выпуска – осуществляется под некоторым избыточным давлением  $p_c = (1,05-1,2)p_0$ , величина которого зависит от гидравлических потерь в выпускной системе. Отработавшие газы покидают цилиндр  $T_r = 900-1100$  К.

Для бензинового двигателя принимается допущение, что основная доля теплоты при сгорании топлива выделяется вблизи ВМТ, т. е. при условиях подвода теплоты при постоянном объеме ( $V = const$ ).

### 2.3. Рабочие процессы четырехтактного дизеля

Типичная индикаторная диаграмма четырехтактного дизеля приведена на рис. 2.2. С целью обеспечения достаточной температуры для надежного самовоспламенения степень сжатия в дизелях назначается много большей, чем в карбюраторных двигателях:  $\varepsilon = 14-23$ .

За первые  $180^\circ$  поворота кривошипа реализуется такт впуска.

Процесс наполнения цилиндров свежим зарядом (в дизеле это воздух) и значения параметров рабочего тела в конце такта (точка  $a$ ) определяются следующими факторами:

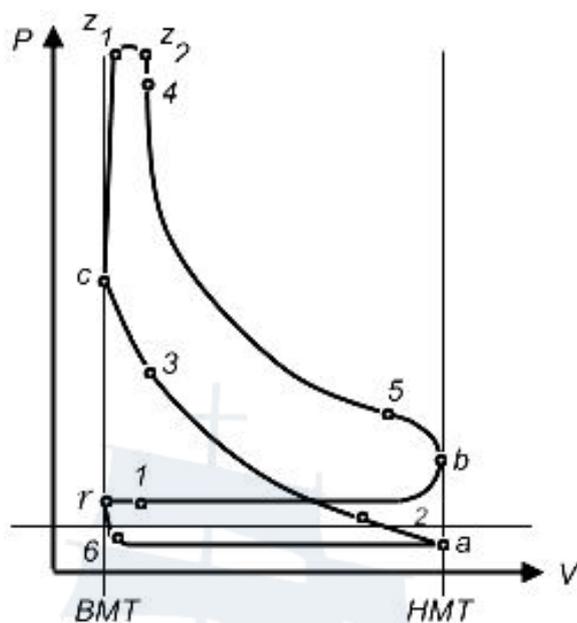


Рис. 2.2. Индикаторная диаграмма дизеля

– гидравлические потери во впускной системе дизеля заметно меньше, чем в бензиновом двигателе (нет дроссельной заслонки), и они не изменяются при изменении нагрузки на двигатель;

– во впускной системе нет отвода теплоты от свежего заряда при испарении топлива ввиду отсутствия последнего в свежем заряде дизеля, вследствие чего отпадает необходимость в специальном подогреве впускного трубопровода.

По этой причине давление в точке  $a$  в дизеле больше, чем в двигателе бензиновом:  $p_a = (0,85-0,92) p_0$ .

Температура  $T_a$  (в точке  $a$ ) в дизеле несколько ниже, чем в бензиновых ДВС ( $T_a = 310-350$  К), в основном из-за того, что при больших степенях сжатия к свежему заряду подмешивается относительно меньшее количество ОГ, имеющих более низкую температуру. Особенностью такта сжатия в дизеле ( $\varphi = 180-360^\circ$ ) являются более высокие, чем в бензиновом двигателе, термодинамические параметры рабочего тела в точке  $c$ :  $p_c = 3,5-6,0$  Мпа;  $T_c = 700-900$  К, что объясняется в основном большей величиной степени сжатия.

В конце такта сжатия в камеру сгорания начинают впрыскивать топливо. Угол, на который повернется коленчатый вал от момента начала впрыскивания топлива до прихода поршня в ВМТ, называется *углом опережения впрыскивания*.

Вследствие начинающегося еще до ВМТ процесса сгорания давление в цилиндре  $p'_c$  превышает расчетное значение  $p_c$ :  $p'_c = (1,05-1,15) p_c$ .

Если в бензиновом двигателе после подачи искры процесс сгорания происходит в условиях заранее подготовленной достаточно однородной рабочей смеси, то в дизеле ее подготовка происходит за короткий интервал времени, предшествующий сгоранию топлива от начала подачи, при этом значительная его часть впрыскивается в цилиндр непосредственно в процессе сгорания. Все это приводит к тому, что вблизи ВМТ в дизеле сгорает существенно меньшая, чем в бензиновом ДВС, часть всего подаваемого топлива и значительное его количество горит после ВМТ при заметном увеличении объема надпоршневого пространства. Поэтому при идеализации действительного цикла дизеля процесс сгорания имитируется подводом части теплоты к рабочему телу при  $V=const$ , а другой части – при  $p=const$ .

В значительной мере следствием этого является то, что степень повышения давления  $\lambda = 1,4-2,2$  меньше, чем аналогичная величина в бензиновом двигателе. Максимальное давление цикла в дизеле и соответствующая температура в точке  $z$ :

$p_z = 6,0-10,0$  МПа;  $T_z = 1800-2300$  К. Более низкие значения  $T_z$ , по сравнению с бензиновым двигателем являются в основном следствием большего значения коэффициента избытка воздуха.

Расчетные параметры рабочего тела в конце такта расширения (точка  $b$ ),  $p_b = 0,2-0,4$  МПа и  $T_b = 1000-1200$  К ниже, чем в бензиновом двигателе из-за более высокой степени сжатия и соответственно большей степени расширения продуктов сгорания.

Такт выпуска ( $\varphi = 540-720^\circ$ ) каких-либо принципиальных особенностей не имеет. Давление в точке  $r$  (конец такта выпуска), как и в случае бензинового двигателя, определяется величиной гидравлических потерь в выпускной системе  $p_r = (1,05-1,2) p_0$ , а температура  $T_r$  ниже, чем в бензиновом двигателе,  $T_r = 700-900$  К, что объясняется более низкой температурой в конце такта расширения  $T_b$ .

## 2.4. Характеристики

Технико-экономические показатели работы автомобильных ДВС, как правило, оценивают по характеристикам, получаемым при стендовых испытаниях. Характеристикой называют графическое изображение зависимости одного или нескольких показателей работы ДВС от показателя, принятого за основу.

Классификация характеристик определяется назначением и показателями, положенными в основу их получения. Различают, например, скоростные, специальные и другие характеристики.

**Скоростные характеристики ДВС** представляют собой графическое изображение закономерностей изменения показателей двигателя от частоты вращения коленчатого вала.

К характеристикам относят: скоростные (внешние и частичные), нагрузочные, регулировочные, внутренних потерь и холостого хода. Такие характеристики снимают в соответствии с ГОСТами при нормальном тепловом состоянии двигателя и с регулировками приборов питания и зажигания, рекомендованными заводами изготовителями.

К специальным характеристикам ДВС относят регулировочные характеристики по расходу топлива и углу опережения зажигания (или впрыска), по которым определяют индикаторные показатели двигателя, тепловой баланс и теплонпряженность его деталей, химический состав, а также токсичность отработавших и картерных газов и т. д.

Внешней скоростной называют характеристику, получаемую при полном открытии дроссельной заслонки в бензиновых двигателях или при крайнем предельном положении рычага управления рейкой топливного насоса высокого давления (ТНВД), соответствующем полной подаче топлива в дизелях. Предельное положение рычага ТНВД устанавливается по инструкции завода-изготовителя.

Строго говоря, понятие внешней скоростной характеристики предполагает получение предельно возможных энергетических показателей двигателя. Для дизелей такие показатели, как известно, лежат за пределом дымления, когда коэффициент избытка воздуха уменьшается до единицы:  $\alpha \rightarrow 1,0$ . Однако с регулировкой ТНВД на такую подачу топлива недопустима эксплуатация дизеля из-за обильного дымления и опасности выхода двигателя из строя вследствие повышенного нагарообразования в камере сгорания.

Кроме того, трудно обеспечить работу дизеля на пределе дымления на всех скоростных режимах. Поэтому крайнее положение рейки ТНВД, установленное заводом-изготовителем для полной подачи топлива, следует принимать как рациональный предел такой подачи. Следовательно, рассматриваемую скоростную характеристику в применении к дизелям можно лишь условно считать внешней.

С некоторым оговорками этот термин применим и к двигателям искровым зажиганием, поскольку упомянутая характеристика не является такой, именно внешней характеристикой, ниже которой располагаются все другие скоростные характеристики. Дело в том, что предельно высокие энергетические показатели данного двигателя с искровым зажиганием можно получить только при оптимальных составах смеси и наивыгоднейших моментах подачи искры в цилиндры, а

существующие автоматы регулирования подачи искры, как правило, не обеспечивают этого в широком диапазоне скоростных режимов.

Типичные внешние скоростные характеристики двигателей с искровым зажиганием и дизелей можно посмотреть в пособии [2]. Прежде всего, они позволяют оценивать энергетические и экономические показатели двигателей, определяют минимально устойчивые частоты вращения ( $n_{min}$ ) и частоты вращения вала, соответствующие максимальным величинам мощности и крутящего момента, минимальному удельному расходу топлива, а также дают представления о закономерностях изменения других оценочных параметров при заводской регулировке приборов питания и зажигания.

Кроме графического изображения мощности, крутящего момента, часового и удельного расходов топлива характеристику иногда дополняют графиками угла опережения зажигания или подачи топлива, разрежения в заданной зоне впускного тракта, температуры смеси или газа, расхода воздуха, состава смеси и т. д.

Частичной скоростной называют характеристику, получаемую при некоторых промежуточных положениях дроссельной заслонки (заслонок), постоянных для каждой характеристики, или неизменном промежуточном положении рычага управления, соответствующем неполной подаче топлива ТНВД в дизелях.

Так же, как и внешние скоростные, эти характеристики позволяют оценить основные параметры двигателей, но в случае работы с частичными нагрузками. Характеристика холостого хода представляет собой графическое изображение часового расхода топлива при работе двигателя без нагрузки.

**Нагрузочные характеристики** представляют собой графические изображения закономерностей изменения ряда параметров двигателя в зависимости от изменения нагрузки при заданной постоянной частоте вращения коленчатого вала. В качестве независимого переменного параметра ГОСТы рекомендуют в этом случае принимать мощность, развиваемую двигателем. Однако независимыми переменными могут служить среднее эффективное давление  $p_e$ , показание динамометра тормоза  $P$ , часовой расход воздуха  $G_b$ , относительное открытие дросселя или перемещения рейки насоса (в дизелях) и другие параметры, характеризующие загруженность двигателя. Для двигателей с искровым зажиганием удобным параметром является, например, давление во впускном трубопроводе  $P_{en}$ , пропорционально которому изменяется наполнение цилиндров.

Все указанные характеристики снимаются с двигателей на специальных нагрузочных стендах, на которых возможно создать нагрузку на двигатель. Электрический тормоз стенда (рис. 2.3) представляет собой асинхронную электрическую машину переменного тока с фазным ротором.

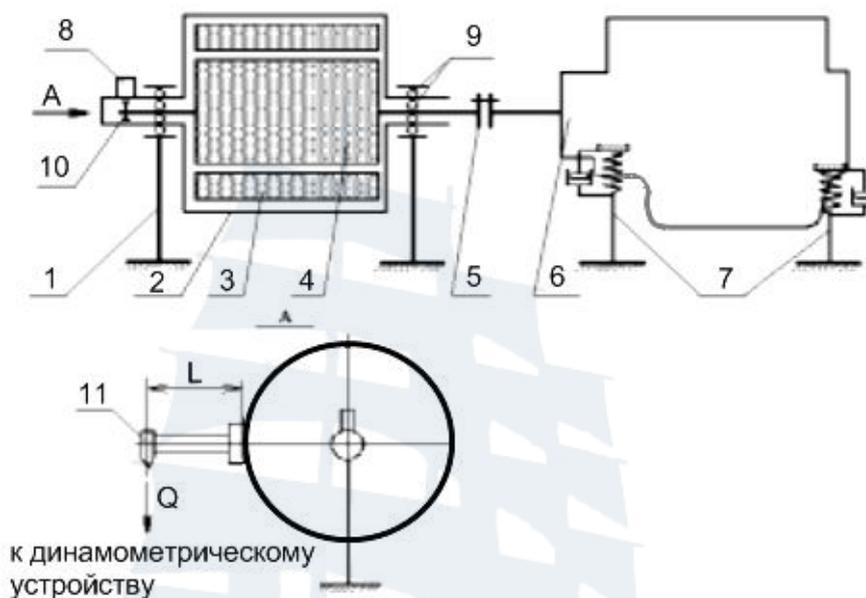


Рис. 2.3. Схема нагрузочного стенда с электрическим тормозом:  
 1 – опоры статора; 2 – статор; 3 – обмотка возбуждения статора; 4 – обмотка возбуждения ротора; 5 – соединительная муфта;  
 6 – двигатель; 7 – опоры двигателя; 8 – датчик частоты вращения;  
 9 – подшипники; 10 – зубчатое колесо; 11 – рычаг динамометра

Статор 2 электрической машины балансирно установлен на подшипниках качения 9 опор 1 фундаментной рамы. Вал ротора (якоря) соединен с помощью муфты 5 с коленчатым валом испытываемого двигателя. Двигатель установлен на резиновых подушках опор 7 фундаментной рамы. Корпус статора с помощью рычага 11 соединен с динамометрическим устройством маятникового типа.

Нагрузочный реостат 8 представляет собой квадратный металлический бак, заполненный электролитом (водный раствор кальцинированной соды), в котором находятся три пары изолированных друг от друга металлических пластиновых ножей большой площади. Число пар соответствует числу фаз силового напряжения. Ножи, закрепленные на валу, могут по дуге опускаться в электролит или подниматься.

Привод вала осуществляется от реверсивного электродвигателя или вручную маховичком. В каждой паре ножей один является токоподводящим, а другой – токоотводящим. Проводником тока между

ножами служит электролит. Реостат позволяет регулировать силу тока путем изменения площади погружения ножей в электролит. Чем больше площадь, тем больше сила тока. При полностью поднятых ножах реостат размыкает силовую цепь якоря.

При замыкании реостатом цепи якоря в обмотках возбуждения якоря и статора возникают электромагнитные поля, взаимодействующие между собой. В результате взаимодействия на якоре возникает крутящий момент, а на статоре – противоположно направленный реактивный момент. Такой режим работы электрической машины является тяговым. С увеличением силы тока возбуждения частота вращения вала электрической машины возрастает до достижения максимального значения, равного синхронной частоте вращения электромагнитных полей статора и ротора, которая составляет  $1600 \text{ мин}^{-1}$ . При превышении этой частоты, например, при работе двигателя в диапазоне частот вращения от  $1600 \text{ мин}^{-1}$  и более, электрическая машина переходит в тормозной режим работы (режим генератора). В этом случае электромагнитное поле якоря противодействует вращению якоря, а следовательно, и вращению вала испытываемого двигателя. На статоре при этом возникает реактивный момент, равный крутящему моменту двигателя. Изменение тормозного момента осуществляется путем изменения силы тока в обмотке возбуждения якоря.

Электрическая энергия, вырабатываемая электрическим тормозом, при работе в тормозном режиме, поглощается нагрузочным реостатом или передается в общую электрическую сеть, что позволяет утилизировать механическую энергию испытываемого двигателя.

### **3. КОНСТРУКЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ**

#### **3.1. Конструкции систем питания двигателей с впрыском бензина**

##### ***3.1.1. Общие понятия и классификация впрысковых систем***

Системы питания двигателей с впрыском и принудительным зажиганием вытеснили карбюраторные двигатели, имеющие низкие экологические и экономические показатели.

В этих системах впрыска отсутствует карбюратор, что ведет к уменьшению сопротивления впускной системы, повышается равномерность распределения топлива по цилиндрам и уменьшается при-

мерно в два раза неоднородность топливовоздушной смеси, поступающей в отдельные цилиндры двигателя. Это позволяет повысить степень сжатия на 2,0-3,0 единицы без опасности детонации и экономичность двигателя.

Впервые система (механическая) впрыска бензина была разработана компанией Даймлер-Бенц (серийный автомобиль «Мерседес-Бенц», 1956 г.).

Сейчас подавляющее большинство современных легковых автомобилей имеют двигатели с впрыском бензина, грузовые автомобили как правило оборудованы дизелями.

Впрыскивающие топливные системы классифицируют по различным признакам (рис. 3.1, 3.2).

Наибольшее распространение в четырехтактных двигателях получили системы с впрыскиванием бензина электромагнитными форсунками под давлением 0,1-0,6 МПа во впускной тракт. В то же время, начиная с 1998 года, ведущие автомобилестроительные фирмы мира перешли на впрыскивание бензина непосредственно в цилиндр, преодолев технологические препятствия (трудности размещения форсунки в камере сгорания и высокое давление впрыскивания: 3,5-10,0 МПа).

Следует напомнить, что указанный способ впрыскивания топлива ранее применялся главным образом в авиационных и двигателях некоторых гоночных автомобилей.

В конце 60-х начале 70-х годов XX века остро встала проблема загрязнения окружающей среды промышленными отходами, среди которых значительную часть составляли выхлопные газы автомобилей. До этого времени состав продуктов сгорания двигателей внутреннего сгорания никого не интересовал.

В целях максимального использования воздуха в процессе сгорания и достижения максимально возможной мощности двигателя состав смеси регулировался с таким расчетом, чтобы в ней был избыток бензина. В результате в продуктах сгорания совершенно отсутствовал кислород, однако оставалось несгоревшее топливо, а вредные для здоровья вещества образуются главным образом при неполном сгорании.

В стремлении повышать мощность конструкторы устанавливали на карбюраторы ускорительные насосы, впрыскивающие топливо во впускной коллектор при каждом резком нажатии на педаль акселератора, т. е. когда требуется резкий разгон автомобиля.

В цилиндры при этом попадает чрезмерное количество топлива, не соответствующее количеству воздуха. В условиях городского движения ускорительный насос срабатывает практически на всех перекрестках со светофорами, где автомобили должны то останавливаться, то быстро трогаться с места. Неполное сгорание имеет место также при работе двигателя на холостых оборотах, а особенно при торможении двигателем.

При закрытом дросселе воздух проходит через каналы холостого хода карбюратора с большой скоростью, всасывая слишком много топлива. Из-за значительного разрежения во впускном трубопроводе в цилиндры засасывается мало воздуха, давление в камере сгорания остается к концу такта сжатия сравнительно низким, процесс сгорания чрезмерно богатой смеси проходит медленно, и в выхлопных газах остается много несгоревшего топлива. Описанные режимы работы двигателя резко повышают содержание токсических соединений в продуктах сгорания.

Стало очевидно, что для понижения вредных для жизнедеятельности человека выбросов в атмосферу надо кардинально менять подход к конструированию топливной аппаратуры.

Для снижения вредных выбросов в систему выпуска было предложено устанавливать каталитический нейтрализатор отработавших газов. Но катализатор эффективно работает только при сжигании в двигателе так называемой нормальной топливо-воздушной смеси (весовое соотношение воздух / бензин 14,7:1). Любое отклонение состава смеси от указанного приводило к падению эффективности его работы и ускоренному выходу из строя. Для стабильного поддержания такого соотношения рабочей смеси карбюраторные системы уже не подходили. Альтернативой могли стать только системы впрыска. Первые системы были чисто механическими с незначительным использованием электронных компонентов. Но практика использования этих систем показала, что параметры смеси, на стабильность которых рассчитывали разработчики, изменяются по мере эксплуатации автомобиля. Этот результат вполне закономерен, учитывая износ и загрязнение элементов системы и самого двигателя внутреннего сгорания в процессе его службы.

Встал вопрос о системе, которая смогла бы сама себя корректировать в процессе работы, гибко сдвигая условия приготовления рабочей смеси в зависимости от внешних условий. Выход был найден

следующий. В систему впрыска ввели обратную связь – в выпускную систему, непосредственно перед катализатором, поставили датчик содержания кислорода в выхлопных газах, так называемый лямбда-зонд. Данная система разрабатывалась уже с учетом наличия такого основополагающего для всех последующих систем элемента, как электронный блок управления (ЭБУ). По сигналам датчика кислорода ЭБУ корректирует подачу топлива в двигатель, точно выдерживая нужный состав смеси.

Инжекторный (впрысковый) двигатель практически полностью заменил устаревшую карбюраторную систему. Инжекторный двигатель существенно улучшает эксплуатационные и мощностные показатели автомобиля (динамика разгона, экологические характеристики, расход топлива).

Инжекторные системы подачи топлива имеют перед карбюраторными следующие основные преимущества:

- точное дозирование топлива и более экономный его расход.
- снижение токсичности выхлопных газов. Достигается за счет оптимальности топливно-воздушной смеси и применения датчиков параметров выхлопных газов.
- увеличение мощности двигателя примерно на 7-10 %. Происходит за счет улучшения наполнения цилиндров, оптимальной установки угла опережения зажигания, соответствующего рабочему режиму двигателя.
- улучшение динамических свойств автомобиля. Система впрыска незамедлительно реагирует на любые изменения нагрузки, корректируя параметры топливно-воздушной смеси.
- легкость пуска независимо от погодных условий.

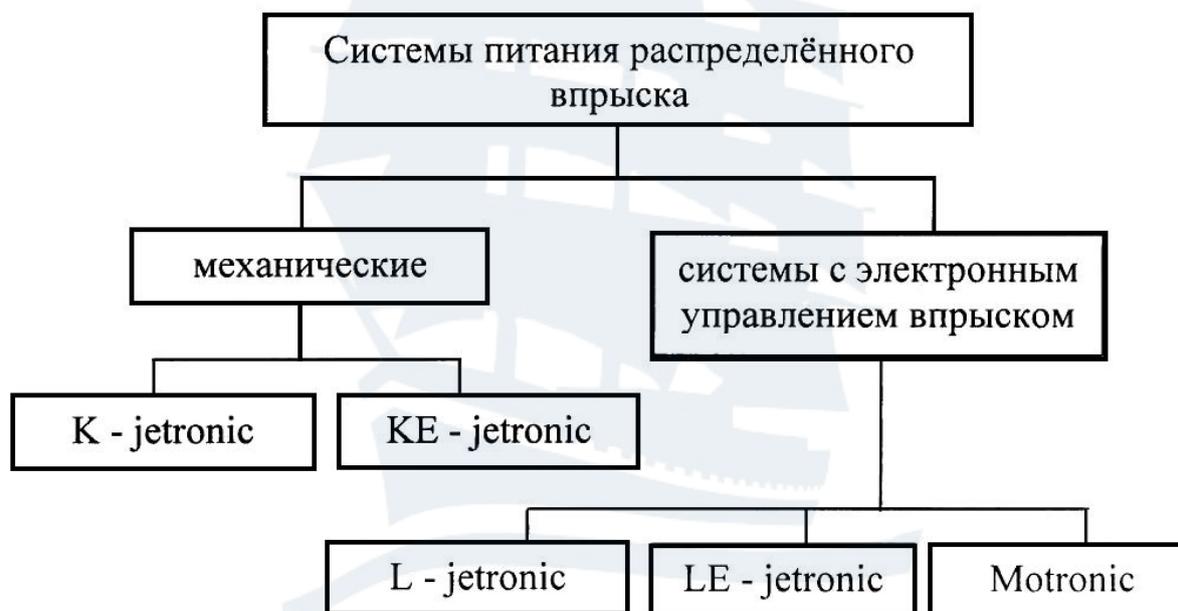
Основными недостатками систем впрыскивания являются:

- наличие большого количества высокотехнологичных деталей и электронных элементов обуславливает более высокую (в 3-4 раза) стоимость систем по сравнению с карбюраторными;
- необходимость высокой квалификации персонала для обслуживания и ремонта.

Мощность двигателя с впрыскиванием бензина регулируют при помощи дроссельной заслонки, которая изменяет количество воздуха, поступающего в цилиндры, а состав смеси зависит от массы впрыскиваемого топлива.



*Рис. 3.1. Классификация способов впрыска бензина*



*Рис. 3.2. Классификация систем впрыска*

Состав смеси регулируют: по расходу воздуха; по расходу воздуха и частоте вращения коленчатого вала (ЧВ); углу открытия дроссельной заслонки и ЧВ; разрежению во впускной системе и ЧВ; составу отработавших газов. Корректировку состава смеси осуществляют также в зависимости от температурного режима работы двигателя, давления и температуры окружающего воздуха.

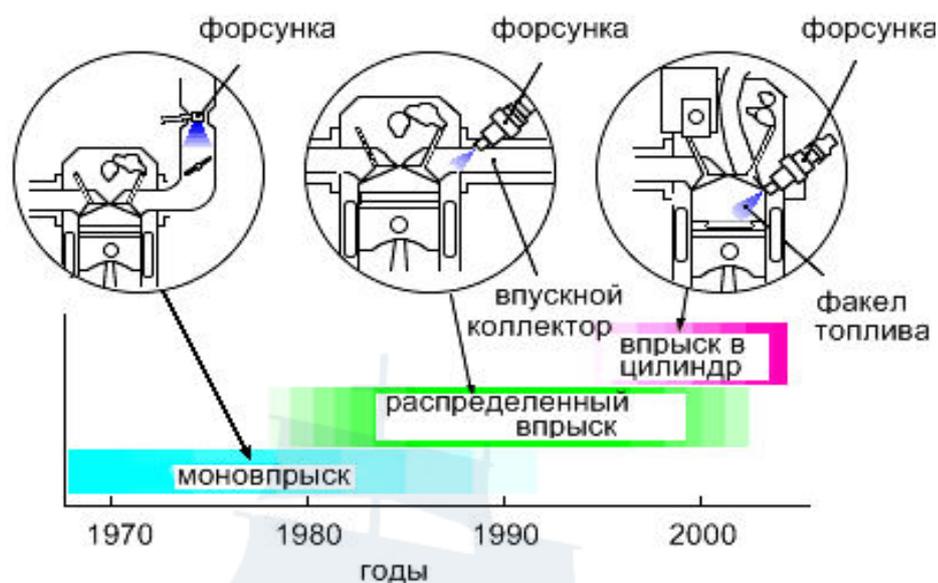


Рис. 3.3. Эволюция способов впрыска бензина

Иллюстрацией признаков классификации может служить рис. 3.3.

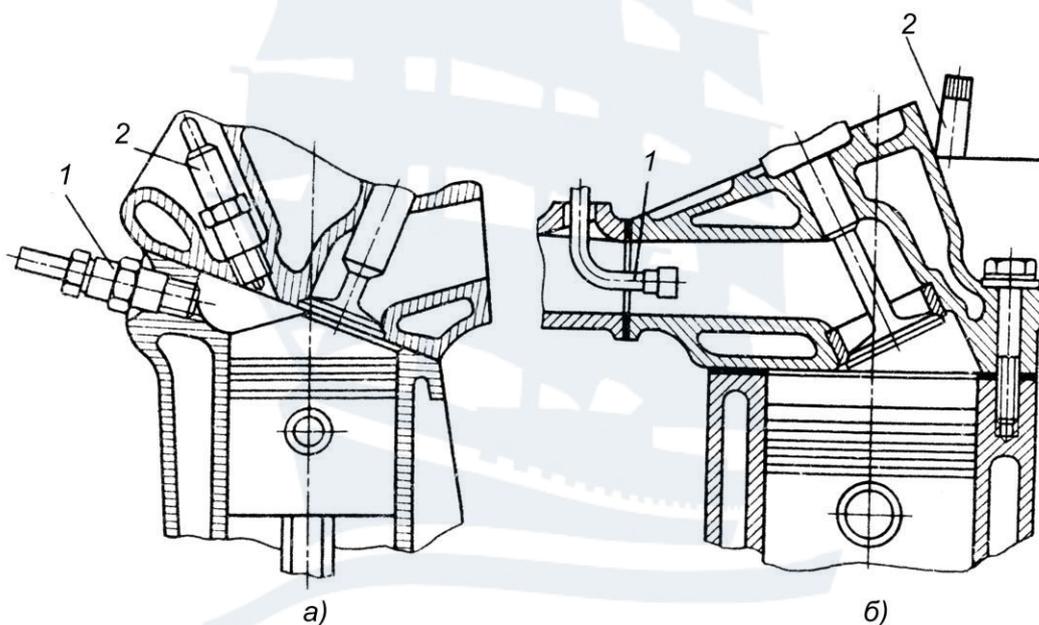


Рис. 3.4. Расположение форсунок в зависимости от места подвода бензина:

а – впрыскивание в цилиндр; б – впрыскивание в воздушный трубопровод;  
1 – форсунка; 2 – свеча зажигания

В зависимости от принятого способа регулирования изменяется состав датчиков, регулирующей и впрыскивающей аппаратуры.

### 3.1.2. Механическая система постоянного впрыска

В числе первых в серийном производстве была освоена и широко внедрена на всех марках европейских автомобилей механическая система постоянного впрыска группы К (от нем. Kontinuerlich – непрерывность); "К-Jetronic" фирмы BOSCH (рабочее давление топлива в системе 0,45-0,62 МПа) и их аналоги (выпускались по 1989 год). Схема систем впрыскивания такого типа представлена на рис. 3.5.

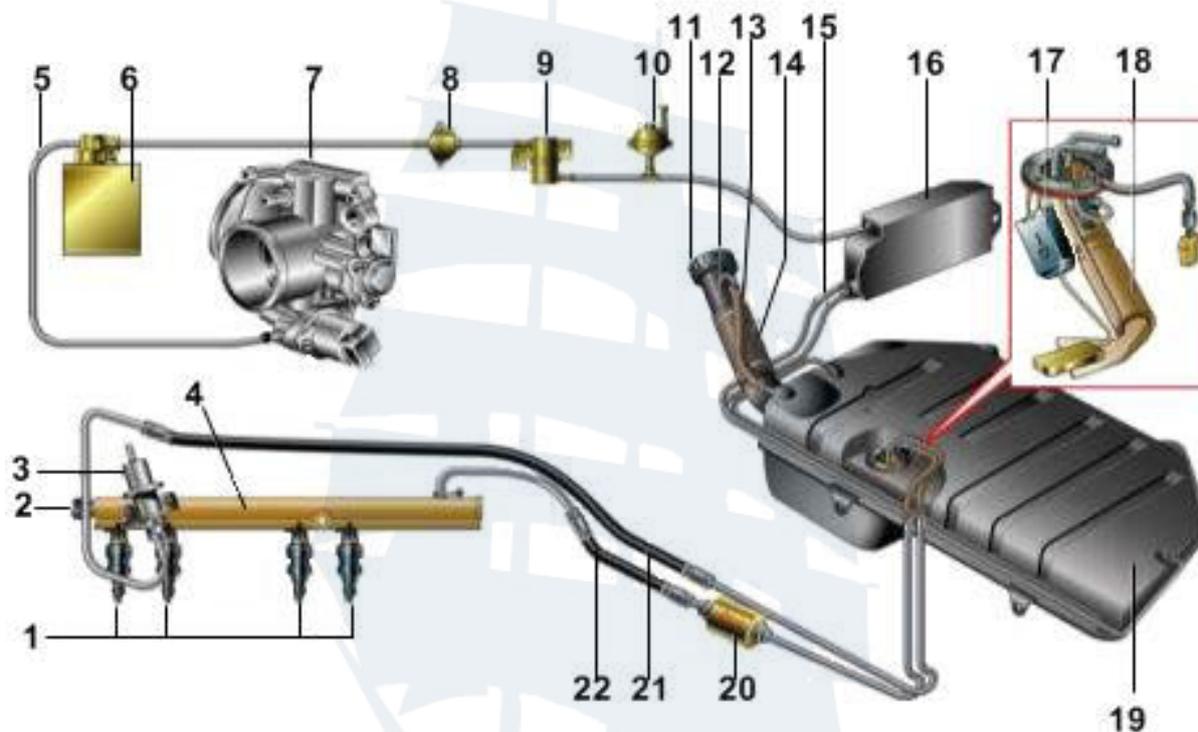


Рис. 3.5. Схема механической системы питания бензинового двигателя "К-Jetronic":

- 1 – форсунки; 2 – колпачок штуцера контроля давления топлива; 3 – регулятор давления топлива; 4 – топливная рампа; 5 – шланг для отсоса паров бензина из адсорбера; 6 – адсорбер с электромагнитным клапаном; 7 – дроссельный узел; 8 – двухходовой клапан; 9 – пусковая форсунка; 10 – предохранительный клапан; 11 – пробка; 12 – наливная труба; 13 – шланг топливного бака и наливной трубы; 14 – шланг наливной трубы; 15 – шланги сепаратора; 16 – сепаратор; 17 – датчик уровня топлива; 18 – электробензонасос; 19 – топливный бак; 20 – топливный фильтр; 21 – сливной топливопровод; 22 – подающий топливопровод

Топливо из бака 19 подается насосом 18 через фильтр 20 и топливную рампу 4 по топливопроводу высокого давления в полость

регулятора подачи топлива 3, работа которого и определяет давление в рампе 4. Форсунки работают непрерывно (нефазированный впрыск).

В период пуска и прогрева двигателя работает пусковая электромагнитная форсунка 9, в которую топливо поступает из нижней полости регулятора. Пусковая форсунка включается одновременно со стартером и отключается датчиком температуры двигателя при нагревании жидкости в системе охлаждения до заданной температуры.

### ***3.1.3. Электронная система впрыска***

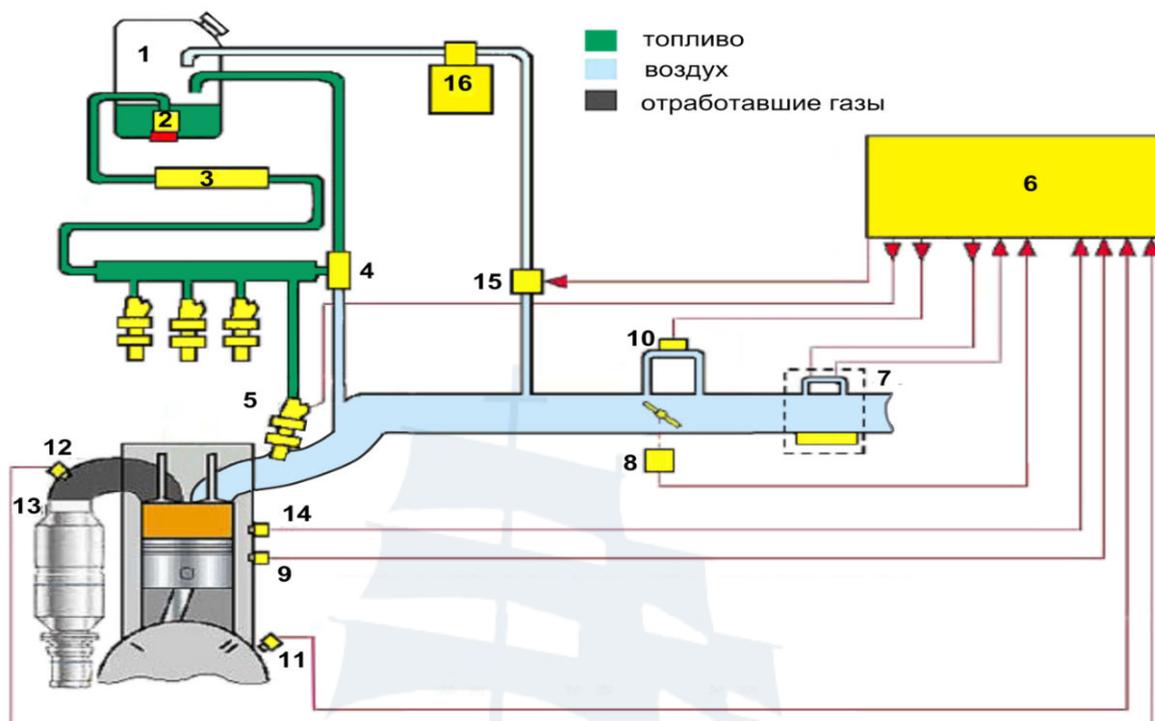
С 1989 года на смену "К-Jetronic" пришли системы с электронным управлением "KE-Jetronic". Система "KE-Jetronic" отличается от ранее описанной наличием электронного блока управления "E-Elektronic", электрогидравлического регулятора управляющего давлением. Кроме этого система имеет установленный на рычаге расходомера воздуха реостатный датчик и выключатель положения дроссельной заслонки, сообщающие электрическими сигналами в электронный блок управления информацию о положении напорного диска расходомера воздуха, а также о положениях и скоростях открытия и закрытия дроссельной заслонки. Система "KE-Jetronic" более сложная, но позволяет лучше оптимизировать дозирование топлива.

В современных впрысковых двигателях для каждого цилиндра предусмотрена индивидуальная форсунка. Все форсунки соединяются с топливной рампой, где топливо находится под давлением, которое создает электробензонасос. Схема систем впрыскивания "KE-Jetronic" с распределенным впрыском представлена на рис. 3.6.

Количество впрыскиваемого топлива зависит от продолжительности открытия форсунки 5. Момент открытия регулирует электронный блок управления (контроллер) 6 на основании обрабатываемых им данных от различных датчиков.

Датчик массового расхода воздуха 7 служит для расчета подачи топлива в цилиндр за один цикл. Измеряется массовый расход воздуха, в соответствии с которым рассчитывается величина подачи топлива форсункой. При аварии датчика его показания игнорируются, расчет идет по аварийным таблицам.

Датчик положения дроссельной заслонки 8 служит для расчета фактора нагрузки на двигатель и его изменения в зависимости от угла открытия дроссельной заслонки, оборотов двигателя и циклового наполнения.



*Рис. 3.6. Принципиальная схема распределенного впрыска:  
 1 – топливный бак; 2 – электробензонасос; 3 – топливный фильтр;  
 4 – регулятор давления топлива; 5 – форсунка; 6 – электронный блок управления (контроллер); 7 – датчик массового расхода воздуха;  
 8 – датчик положения дроссельной заслонки; 9 – датчик температуры жидкости; 10 – регулятор холостого хода; 11 – датчик положения коленвала; 12 – датчик кислорода (обратная связь); 13 – нейтрализатор;  
 14 – датчик детонации; 15 – клапан продувки адсорбера; 16 – адсорбер*

Датчик температуры охлаждающей жидкости 9 служит для определения коррекции топливоподачи и зажигания по температуре и для управления электроклапаном. При аварии датчика его показания игнорируются, температура берется из таблицы в зависимости от времени работы двигателя.

Датчик положения коленвала (ДПКВ) 11 служит для общей синхронизации системы, расчета оборотов двигателя и положения коленвала в определенные моменты времени. ДПКВ – полярный датчик. При аварии датчика работа системы невозможна. Это единственный «жизненно важный» в системе датчик, при неисправности которого движение автомобиля невозможно. Аварии всех остальных датчиков позволяют своим ходом добраться до автосервиса (режим – «хромай домой»).

Датчик кислорода 12 предназначен для определения концентрации кислорода в отработавших газах. Информация, которую выдает

датчик, используется электронным блоком управления для корректировки количества подаваемого топлива. Датчик кислорода используется только в системах с каталитическим нейтрализатором под нормы токсичности Евро-2 и Евро-3 (в Евро-3 используется два датчика кислорода – до катализатора и после него).

Датчик детонации *14* служит для контроля за детонацией. При обнаружении последней ЭБУ включает алгоритм гашения детонации, оперативно корректируя угол опережения зажигания в сторону его уменьшения.

Здесь перечислены только некоторые основные датчики, необходимые для работы системы. Комплектации датчиков на различных автомобилях зависят от системы впрыска, от норм токсичности и пр.

По результатам «опроса» определенных в программе датчиков, программа ЭБУ осуществляет управление исполнительными механизмами, к которым относятся: форсунки, бензонасос, модуль зажигания, регулятор холостого хода, клапан адсорбера системы улавливания паров бензина, вентилятор системы охлаждения и др. (все опять же зависит от конкретной модели).

Из всего перечисленного, остается добавить, что такое адсорбер. Адсорбер *16* является элементом замкнутой цепи рециркуляции паров бензина. Нормами Евро-2 запрещен контакт вентиляции бензобака с атмосферой, пары бензина должны собираться (адсорбироваться) и при продувке посылаться в цилиндры на дожигание. На неработающем двигателе пары бензина попадают в адсорбер из бака и впускного коллектора, где происходит их поглощение. При запуске двигателя адсорбер по команде ЭБУ продувается потоком воздуха, всасываемого двигателем, пары увлекаются этим потоком и дожигаются в камере сгорания.

#### ***3.1.4. Типы систем впрыска бензина***

В зависимости от количества форсунок и места подачи топлива, *системы впрыска подразделяются на три типа: одноточечный или моновпрыск* (одна форсунка во впускном коллекторе на все цилиндры), *многоточечный или распределенный* (у каждого цилиндра своя форсунка, которая подает топливо в коллектор) *и непосредственный* (топливо подается форсунками непосредственно в цилиндры, как у дизелей).

*Одноточечный моновпрыск* проще, он менее начинен управляющей электроникой, но и менее эффективен. Управляющая электро-

ника позволяет снимать информацию с датчиков и сразу же менять параметры впрыска.

Немаловажно и то, что под моновпрыск легко адаптируются карбюраторные двигатели почти без конструктивных переделок или технологических изменений в производстве.

У одноточечного впрыска преимущество перед карбюратором состоит в экономии топлива, экологической чистоте и относительной стабильности и надежности параметров. А вот в приёмности двигателя одноточечный впрыск проигрывает. Еще один недостаток: при использовании одноточечного впрыска, как и при использовании карбюратора до 30 % бензина оседает на стенках коллектора.

Системы одноточечного впрыска, безусловно, являлись шагом вперед по сравнению с карбюраторными системами питания, но уже не удовлетворяют современным требованиям.

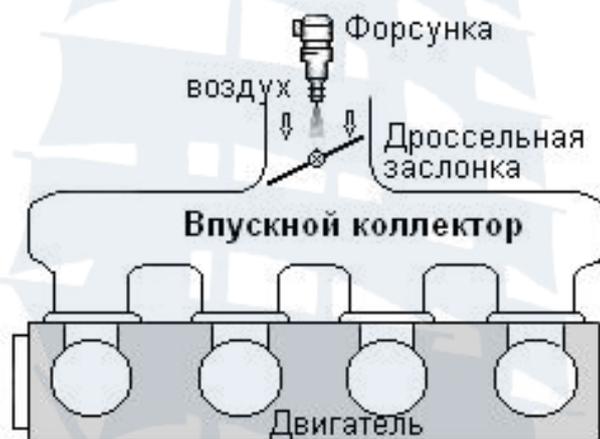


Рис. 3.7. Схема одноточечного моновпрыска

Более совершенными являются системы *многоточечного или распределенного впрыска*, в которых подача топлива к каждому цилиндру осуществляется индивидуально. Распределенный впрыск мощнее, экономичнее и сложнее. Применение такого впрыска увеличивает мощность двигателя примерно на 7-10 процентов. Основные преимущества распределенного впрыска:

- возможность автоматической настройки на разных оборотах и соответственно улучшение наполнения цилиндров, в итоге при той же максимальной мощности автомобиль разгоняется гораздо быстрее;
- бензин впрыскивается вблизи впускного клапана, что существенно снижает потери на оседание во впускном коллекторе и позволяет осуществлять более точную регулировку подачи топлива.

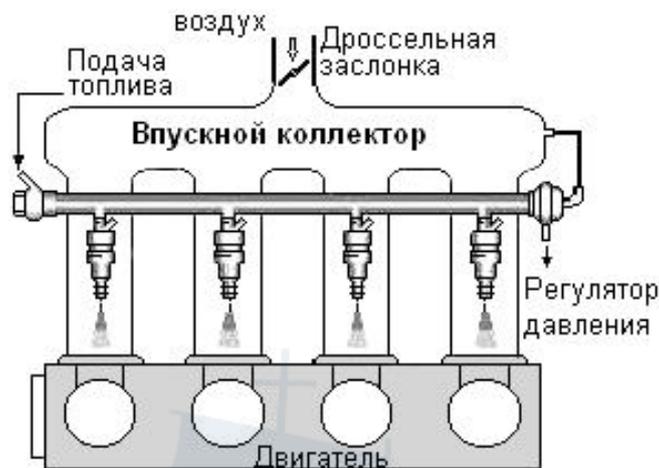


Рис. 3.8. Схема распределенного впрыска (многоточечного)

*Непосредственный впрыск* как очередное и эффективное средство в деле оптимизации сгорания смеси и повышения КПД бензинового двигателя реализует простые принципы. А именно: более тщательно распыляет топливо, лучше перемешивает с воздухом и грамотней распорядится готовой смесью на разных режимах работы двигателя.

В итоге двигатели с непосредственным впрыском потребляют меньше топлива, чем обычные «впрысковые» моторы (в особенности при спокойной езде на невысокой скорости); при одинаковом рабочем объеме они обеспечивают более интенсивное ускорение автомобиля; у них чище выхлоп; они гарантируют более высокую литровую мощность за счет большей степени сжатия и эффекта охлаждения воздуха при испарении топлива в цилиндрах.

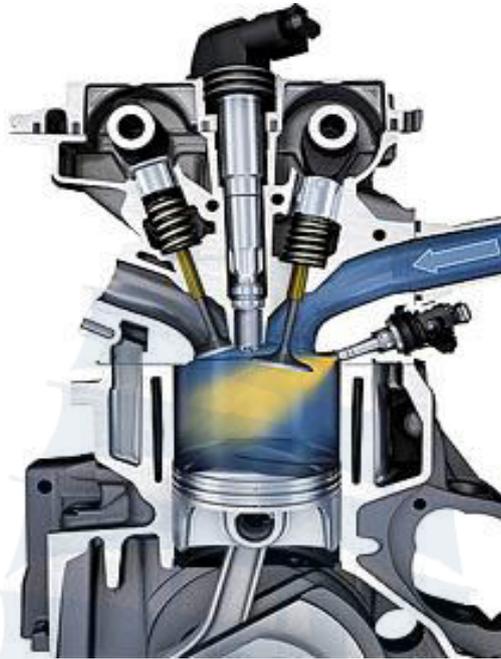
В то же время они нуждаются в качественном бензине с низким содержанием серы и механических примесей (песка), чтобы обеспечить нормальную работу топливной аппаратуры.

А как раз главное несоответствие между ГОСТами, ныне действующими в России, и евростандартами – повышенное содержание серы, ароматических углеводородов и бензола. Например, российский стандарт допускает наличие 500 мг серы в 1 кг топлива, тогда как «Евро-3» – 150 мг, «Евро-4» – лишь 50 мг, а «Евро-5» – всего 10 мг.

Сера и вода способны активизировать коррозионные процессы на поверхности деталей, а песок и сажа являются источником абразивного износа калиброванных отверстий форсунок и плунжерных пар насосов. В результате износа снижается рабочее давление насоса. Ухудшается качество распыления бензина.

Все это отражается на характеристиках двигателей и равномерности их работы.

Первой применила двигатель с непосредственным впрыском на серийном автомобиле компания Mitsubishi (рис. 3.9).



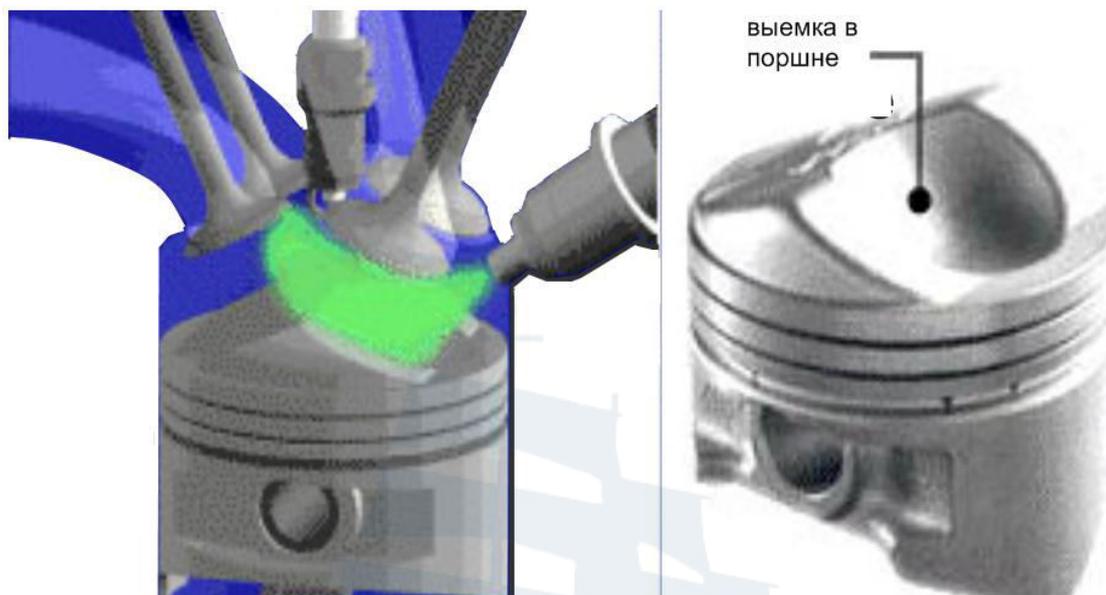
*Рис. 3.9. Непосредственный впрыск в цилиндр*

Рассмотрим устройство и принципы действия непосредственного впрыска на примере двигателя GDI (Gasoline Direct Injection). Двигатель GDI может работать в режиме сгорания сверхобедненной топливовоздушной смеси: соотношение воздуха и топлива по массе до 30-40:1. Максимально возможное для традиционных инжекторных двигателей с распределенным впрыском соотношение равно 20-24:1 (оптимальный, так называемый стехиометрический, состав – 14,7:1) – если избыток воздуха будет больше, переобедненная смесь просто не воспламенится.

На двигателе GDI распыленное топливо находится в цилиндре в виде облака, сосредоточенного в районе свечи зажигания. Поэтому, хотя в целом смесь переобедненная, у свечи зажигания она близка к стехиометрическому составу и легко воспламеняется.

В то же время, обедненная смесь в остальном объеме имеет намного меньшую склонность к детонации, чем стехиометрическая. Последнее обстоятельство позволяет повысить степень сжатия, а значит увеличить и мощность, и крутящий момент

За счет того, что при впрыскивании и испарении в цилиндр топлива, воздушный заряд охлаждается, вращаясь в выемке поршня (рис. 3.10) несколько улучшается наполнение цилиндров, что также снижает вероятность возникновения детонации.



*Рис. 3.10. Камера сгорания и поршень двигателя GDI*

### ***Режимы работы двигателя GDI***

Всего предусмотрено три режима работы двигателя:

- режим сгорания сверхбедной смеси (впрыск топлива на такте сжатия);
- мощностной режим (впрыск на такте впуска);
- двухстадийный режим (впрыск на тактах впуска и сжатия) (применяется на евромодификациях).

*Режим сгорания сверхбедной смеси* (впрыск топлива на такте сжатия). Этот режим используется при малых нагрузках: при спокойной городской езде и при движении за городом с постоянной скоростью (до 120 км/ч). Топливо впрыскивается компактным факелом в конце такта сжатия в направлении поршня, отражается от него, смешивается с воздухом и испаряется, направляясь в зону свечи зажигания. Хотя в основном объеме камеры сгорания смесь чрезвычайно обеднена, заряд в районе свечи достаточно обогащен, чтобы воспламениться от искры и поджечь остальную смесь. В результате двигатель устойчиво работает даже при общем соотношении воздуха и топлива в цилиндре 40:1.

Работа двигателя на сильнообедненной смеси поставила новую проблему – нейтрализацию отработавших газов. Дело в том, что при этом режиме основную их долю составляют оксиды азота, и поэтому обычный каталитический нейтрализатор становится малоэффектив-

ным. Для решения этой задачи была применена рециркуляция отработавших газов (EGR-Exhaust Gas Recirculation), которая резко снижает количество образующихся оксидов азота и установлен дополнительный NO-катализатор.

Система EGR «разбавляя» топливо-воздушную смесь отработавшими газами, снижает температуру горения в камере сгорания, тем самым «приглушая» активное образование вредных оксидов, в том числе NOx. Однако обеспечить полную и стабильную нейтрализацию NOx только за счет EGR невозможно, так как при увеличении нагрузки на двигатель количество перепускаемых ОГ должно быть уменьшено. Поэтому на двигатель с непосредственным впрыском был внедрен NO-катализатор.

Существует две разновидности катализаторов для уменьшения выбросов NOx – селективные (Selective Reduction Type) и накопительного типа (NOx Trap Type). Катализаторы накопительного типа более эффективны, но чрезвычайно чувствительны к высокосернистым топливам, чему менее подвержены селективные. В соответствии с этим, накопительные катализаторы устанавливаются на модели для стран с низким содержанием серы в бензине, и селективные – для остальных.

*Мощностной режим* (впрыск на такте впуска). Так называемый «режим однородного смесеобразования» используется при интенсивной городской езде, высокоскоростном загородном движении и обгонах. Топливо впрыскивается на такте впуска коническим факелом, перемешиваясь с воздухом и образуя однородную смесь, как в обычном двигателе с распределенным впрыском. Состав смеси – близок к стехиометрическому (14,7:1)

*Двухстадийный режим* (впрыск на тактах впуска и сжатия). Этот режим позволяет повысить момент двигателя в том случае, когда водитель, двигаясь на малых оборотах, резко нажимает педаль акселератора. Когда двигатель работает на малых оборотах, а в него вдруг подается обогащенная смесь, вероятность детонации возрастает. Поэтому впрыск осуществляется в два этапа. Небольшое количество топлива впрыскивается в цилиндр на такте впуска и охлаждает воздух в цилиндре. При этом цилиндр заполняется сверхбедной смесью (примерно 60:1), в которой детонационные процессы не происходят. Затем, в конце такта сжатия, подается компактная струя топлива,

которая доводит соотношение воздуха и топлива в цилиндре до «богатого» 12:1.

Этот режим введен только в автомобилях для европейского рынка, так как для Японии присущи невысокие скорости движения и постоянные автомобильные заторы, а Европа – это протяженные автобаны и высокие скорости (а следовательно, высокие нагрузки на двигатель).

Компания Mitsubishi стала пионером в применении непосредственного впрыска топлива. На сегодняшний день аналогичную технологию используют Mercedes (CGI), BMW (HPI), Volkswagen (FSI, TFSI, TSI) и Toyota (IS).

Главный принцип работы этих систем питания аналогичен – подача бензина не во впускной тракт, а непосредственно в камеру сгорания и формирование послойного либо однородного смесеобразования в различных режимах работы мотора. Но подобные топливные системы имеют и различия, причем иногда довольно существенные. Основные из них – рабочее давление в топливной системе, расположение форсунок и их конструкция.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите преимущества и недостатки системы распределенного впрыска топлива по сравнению с моновпрыском?
2. Принцип дозирования бензина в системе впрыскивания с электронным управлением электромагнитными форсунками?
3. Назовите основные элементы системы питания бензинового двигателя.
4. В чем суть обратной связи через лямбда-зонд?
5. Сформулируйте принцип формирования управляющего сигнала на форсунку.
6. Для чего нужны и как устроены приборы очистки и подачи топлива?
7. Как организован выпуск отработавших газов?
8. Для чего нужна нейтрализация отработавших газов?

## 3.2. Конструкции систем питания дизелей

### 3.2.1. Камеры сгорания и смесеобразование в дизелях

Системы питания топливом дизелей работают в более жёстких условиях, чем бензиновые. Это обусловлено специфическими особенностями внутреннего смесеобразования, большей вязкостью и худшей испаряемостью дизельного топлива по сравнению с бензином.

Особенностью двигателей с самовоспламенением от сжатия или дизелей (по имени изобретателя Р. Дизеля) является приготовление горючей смеси топлива с воздухом внутри цилиндров.

В дизелях топливо поступает от насоса высокого давления и посредством форсунки впрыскивается в цилиндры под давлением, в несколько раз превышающим давление воздуха в конце такта сжатия. Смесеобразование начинается с момента поступления топлива в цилиндр. При этом в результате трения о воздух струя топлива распыляется на мельчайшие частицы, которые образуют топливный факел конусообразной формы. Чем мельче распылено топливо, и чем равномернее распределено оно в воздухе, тем полнее сгорают его частицы.

Испарение и воспламенение топлива осуществляются за счет высокой температуры и давления сжатого воздуха (к концу такта сжатия температура воздуха составляет 550-700 °С, а давление – 3,5-5,5 МПа). Следует отметить, что после начала горения смеси температура и давление в камере сгорания резко возрастают, что ускоряет процессы испарения и воспламенения остальных частиц распыленного факела топлива. Чтобы обеспечить наилучшие мощностные и экономические показатели работы дизеля, необходимо впрыскивать топливо в его цилиндры до прихода поршня в верхнюю мертвую точку (ВМТ). Угол, на который кривошип коленчатого вала не доходит до ВМТ в момент начала впрыскивания топлива, называют углом опережения впрыскивания топлива. Для того чтобы форсунка впрыскивала топливо с требуемым опережением, топливный насос должен начинать подавать топливо еще раньше. Это вызвано необходимостью иметь некоторое время на нагнетание топлива от насоса к форсунке. Угол, на который кривошип коленчатого вала не доходит до ВМТ в момент начала подачи топлива из топливного насоса, называют углом опережения подачи топлива.

В цилиндры дизеля фактически поступает одно и то же количество воздуха независимо от его нагрузки. При малой нагрузке в ци-

линдрах практически всегда имеется достаточное количество воздуха для полного сгорания топлива. В этом случае коэффициент избытка воздуха имеет большую величину. С увеличением нагрузки возрастает только подача топлива, но при этом значение коэффициента избытка воздуха уменьшается, вследствие чего ухудшается процесс сгорания топлива. Поэтому минимальное значение коэффициента избытка воздуха дизелей, соответствующее их бездымной работе, устанавливаются в пределах  $\alpha = 1,3-1,7$ , что обуславливает также высокую экономичность дизелей по сравнению с бензиновыми двигателями.

Существенное влияние на улучшение смесеобразования и процесса сгорания оказывают способы приготовления рабочей смеси и принятая форма камеры сгорания. По способу приготовления рабочей смеси различают объемное, объемно-пленочное и пленочное смесеобразования. Каждому из этих способов присущи свои характерные особенности, для реализации которых требуются камеры сгорания с соответствующими конструктивными решениями. Существующие камеры сгорания дизелей по общности основных признаков их конструкции объединяют в две большие группы: неразделенные (однополосные) и разделенные (двухполосные).

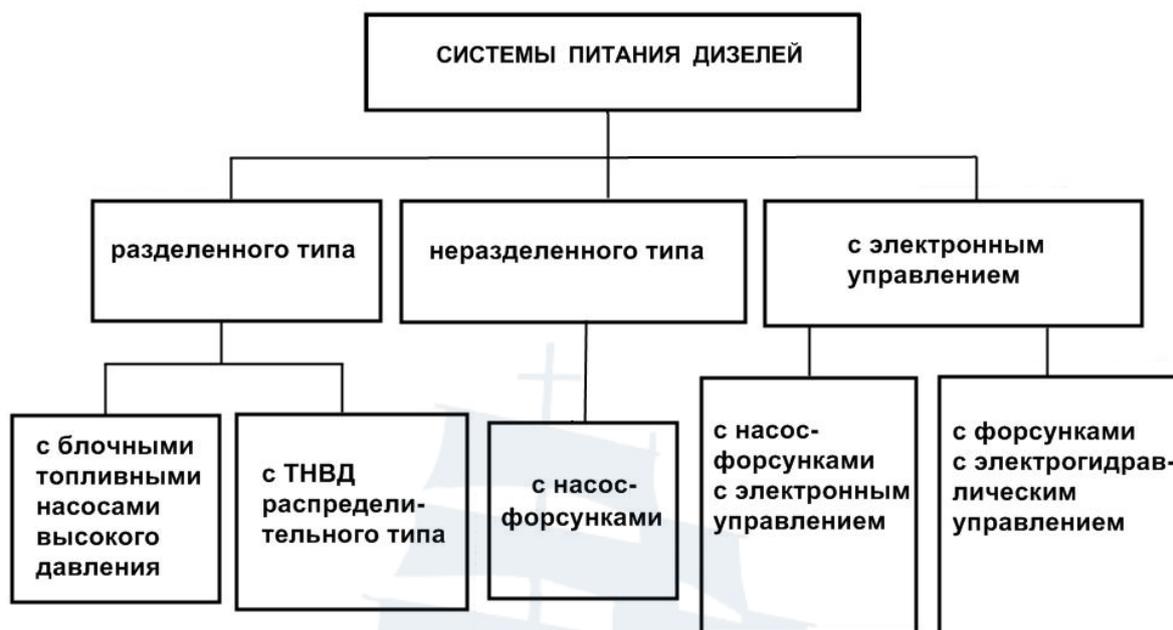
На двигателях грузовых автомобилей применяются системы питания топливом разделённого типа с блочными топливными насосами высокого давления (ТНВД), в которых на каждый цилиндр двигателя имеется отдельная плунжерная пара, и насосами распределительного типа, в которых одна плунжерная пара может подавать топливо в 2-4 цилиндра последовательно в нужные моменты.

Блочный насос высокого давления позволяет реализовывать более высокое давление впрыска, но наличие трубопровода между насосом и форсункой оказывает негативное влияние на характеристики впрыска.

Насосы распределительного типа применяют на легковых автомобилях, они имеют меньшие размеры и дешевле блочных, так как одна секция обеспечивает подачу топлива к форсункам двух, трёх и даже четырёх цилиндров.

Перспективными являются системы питания топливом с электронным управлением впрыском. В настоящее время применяются насос-форсунки с электронным управлением на дизелях фирм: Steyr, Detroit - Diesel, Toyota.

Основная идея системы заключена в следующем: все форсунки топливопроводами соединены с топливной рампой, в которой поддерживается высокое давление топлива.



*Рис. 3.11. Классификация систем впрыска дизелей*

Электромагнитный клапан открывает слив топлива из рампы, при этом под давлением топлива в нагнетательной магистрали форсунка открывается и происходит впрыск. Как только клапан закроет слив, давление в магистрали возрастает и форсунка закрывается.

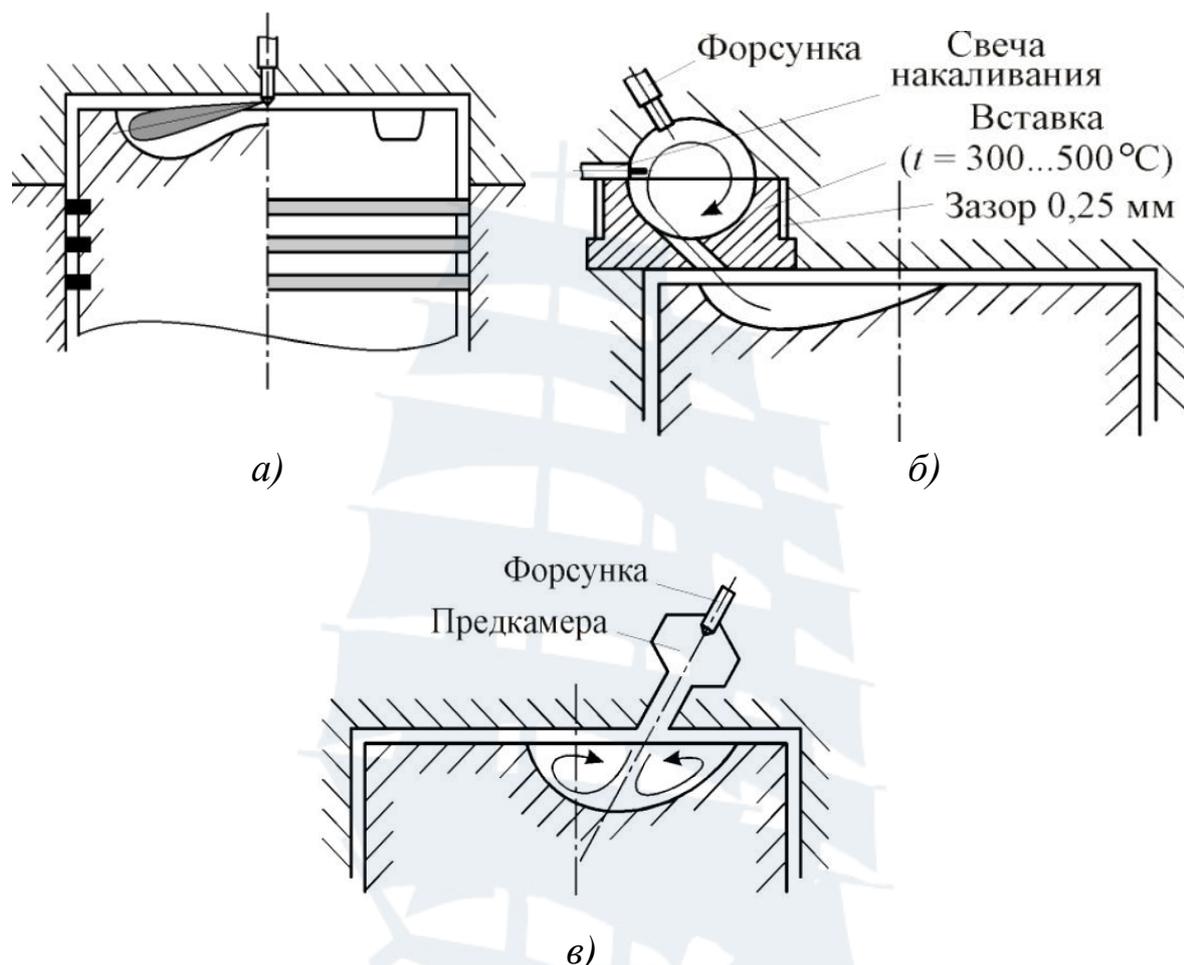
Применение систем питания с электронным управлением впрыском позволяет существенно улучшить качество управления рабочим процессом на различных режимах. Например, осуществить ступенчатый впрыск: первая порция – запальная, вторая – основная, при работе на малых нагрузках часть может быть отключена.

Программы управления рабочим процессом заложены в памяти микропроцессора и он сам выбирает нужную, исходя из сравнения параметров, заложенных в памяти и полученных в результате обработки сигналов от датчиков.

У дизелей требования к форме камеры сгорания определяются процессом смесеобразования. Для создания рабочей смеси в них отводится очень малое время, так как почти сразу после начала впрыска топлива начинается сгорание, и остаток топлива подается уже в горящую среду. Каждая капля топлива должна войти в соприкосновение с воздухом как можно быстрее, чтобы выделение теплоты произошло в начале хода расширения.

Для удовлетворения этих требований необходимым является создание интенсивного направленного движения воздуха, но организовать этот процесс нужно так, чтобы с впрыскиваемым топливом сме-

шалось необходимое для сгорания количество воздуха. Принципиально для этой цели существуют две возможности: направлять либо воздух к топливу, либо топливо к воздуху. У автомобильных дизелей используются оба способа.



*Рис. 3.12. Конструкции камер сгорания дизелей:  
а – неразделенная камера; б – разделенная вихрекамера;  
в – разделенная предкамера*

Таким образом, по способу смесеобразования различают дизели с непосредственным впрыском топлива в цилиндр и дизели с разделенной камерой сгорания. При непосредственном впрыске (рис. 3.12, а) камера сгорания образована в поршне, который имеет более высокую температуру, чем охлаждаемая головка цилиндра.

Это уменьшает потери теплоты горячих газов в стенки камеры сгорания. Камера сгорания должна быть компактной с тем, чтобы потери теплоты при сжатии воздуха также не были большими и, следовательно, для достижения необходимой для воспламенения топлива температуры не требовалась слишком высокая степень сжатия. Вели-

чина степени сжатия дизеля сверху ограничена нагрузкой на кривошипный механизм и потерями на трение, а снизу – условиями обеспечения так называемого холодного пуска. При непосредственном впрыске степень сжатия  $\varepsilon$  лежит в пределах от 15 до 18. При холодном пуске дизели этого типа не требуют дополнительных мер для обеспечения воспламенения топлива.

У дизеля с разделенной камерой сгорания (рис. 4.12, б и 4.12, в) воздух во время такта сжатия поступает во вспомогательную камеру через соединительный канал с большой скоростью и при этом значительно охлаждается.

Поэтому для обеспечения необходимой температуры к моменту воспламенения требуется более высокая степень сжатия – от 20 до 24, но, несмотря на это, при холодном пуске двигателя воздух во вспомогательной камере должен предварительно подогреваться с помощью специальной свечи накаливания, выключаемой после пуска двигателя.

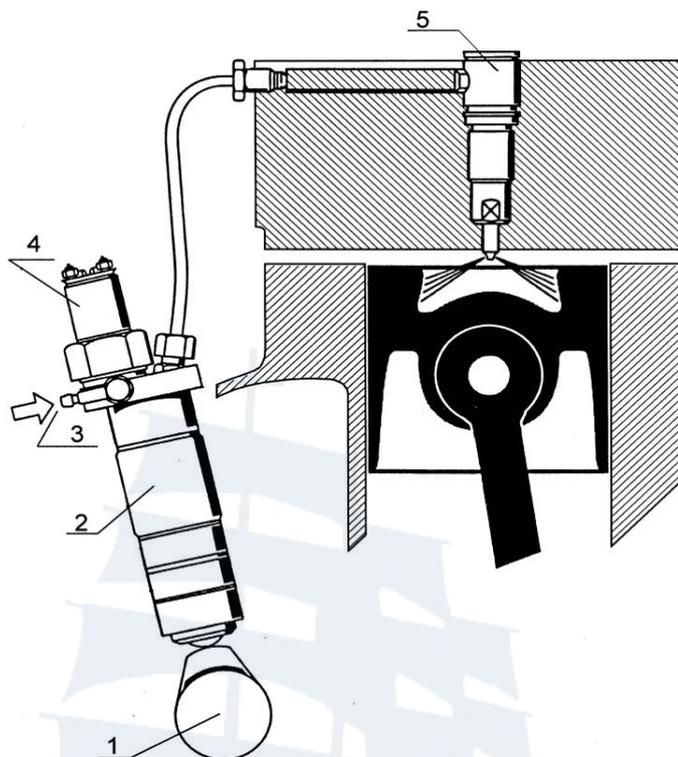
Несмотря на кажущееся сходство бензиновых впрысковых двигателей и дизелей вторые имеют принципиальные отличия:

- у дизелей нет систем зажигания, воспламенение смеси в них происходит за счет сжатия;
- топливо в дизелях подается в цилиндры перед приходом поршня в верхнюю мертвую точку (ВМТ), поэтому подача топлива происходит по большим давлению (180-400 кг/см<sup>2</sup>);
- подача топлива в дизелях продолжается в период начавшегося сгорания смеси, и заканчивается уже после перехода поршнем верхней мертвой точки;
- в дизелях нет дроссельной заслонки, поэтому количество воздуха зависит только от частоты вращения коленвала двигателя.

### **3.2.2. Конструкции насосов и форсунок**

Общее устройство системы впрыска приведено на рис. 3.13.

Топливо подается к патрубку 3 от подкачивающего насоса (на рисунке не показан). Топливный насос высокого давления 2 (ТНВД) внутри имеет плунжерную пару (гильза и плунжер), который выполняет роль поршня). Плунжер под действием вращающегося распределительного вала 1 воздействует кулачком на плунжер, который как насос сжимает топливо и через нагнетательный клапан подает его к форсунке 5.



*Рис. 3.13. Общее устройство топливной системы с ТНВД:  
 1 – распределительный вал, кулачки которого перемещают плунжеры ТНВД, в результате создается высокое давление; 2 – топливный насос ТНВД; 3 – патрубок подвода топлива; 4 – электромагнитный управляющий клапан, управляется от ЭБУ; 5 – форсунка*

Форсунка имеет мощную пружину, которая позволит форсунке открыться только после достижения достаточно высокого давления (от  $140 \text{ кг/см}^2$  и выше).

Данное обстоятельство создает условия для энергичного распыливания топлива под большим давлением, примерно в 2-3 раза большим, чем давление в цилиндре в конце процесса сжатия.

Плунжерная пара ТНВД приведена на рис. 3.14, б. Плунжер 5 совершает внутри неподвижной гильзы 6 два движения – вверх-вниз 8 (засасывая топливо и сжимая его), и влево-вправо 9 (рис. 3.14, а) на некоторый угол.

Поворот 9 плунжера регулирует количество подаваемого в форсунку топлива. На плунжере имеется фигурный вырез 3. При движении плунжера вверх сжатие и подача топлива в форсунку будут происходить до подхода этого выреза до отверстия 10 в гильзе. При совмещении фигурного выреза 3 с отверстием 10 давление над плунжером резко упадет, так как топливо из надплунжерной полости уйдет через сверления в плунжере, фигурный вырез 3 и отверстие 10 на слив в бак.

Разумеется, что в зависимости от поворота плунжера фигурный вырез 3 будет совпадать с отверстием 10 раньше или позже, а подача топлива будет соответственно меньше или больше. Так регулируется величина подачи топлива.

Поворот плунжера происходит за счет движения рейки 1 вперед-вперед 7. Рейка через вильчатый хомут 4 и поводок 2 поворачивает на некоторый угол плунжер 5.

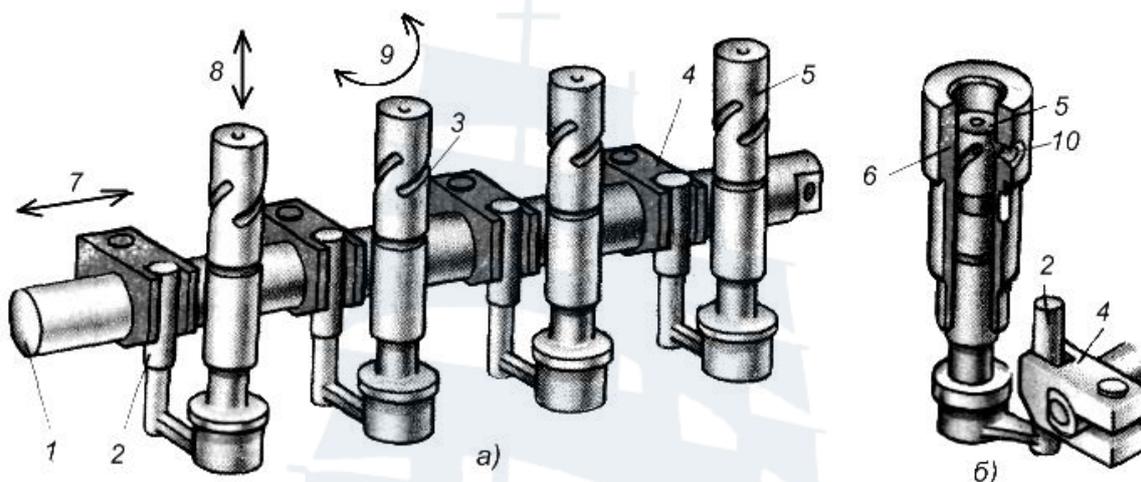


Рис. 3.14. Детали топливного насоса:

а – механизм поворота плунжеров; б – детали насосной секции;  
 1 – рейка; 2 – поводок; 3 – фигурный вырез плунжера; 4 – вильчатый хомут; 5 – плунжер; 6 – гильза плунжера; 7 – движение рейки;  
 8 – движение плунжера; 9 – поворот плунжера как результат движения 7 рейки; 10 – отверстие в гильзе

#### 4.2.3. Регулятор частоты вращения коленчатого вала двигателя

У бензинового двигателя естественным регулятором частоты вращения является дроссельная заслонка, чем больше она открыта, тем больше горючей смеси поступает в двигатель.

У дизеля такой заслонки нет, количество поступающего воздуха в двигатель зависит от частоты вращения двигателя, а количество подаваемого в цилиндры топлива с увеличением частоты также увеличивается, так как плунжеры ТНВД совершают ходы вверх-вниз чаще.

В связи с этим даже небольшое увеличение частоты (например, по причине снижения нагрузки – машина пошла под уклон) может привести к неконтролируемому увеличению частоты вращения двигателя сверх предельной вплоть до его поломки. Поэтому дизели не мо-

гут работать без регулятора частоты. Регуляторы бывают всережимные (рис. 3.15, а) и двухрежимные (рис. 3.15, б).

Двухрежимный регулятор ограничивает максимальную частоту вращения (предотвращает разнос), и минимальную частоту (чтобы двигатель не заглох). В среднем диапазоне регулятор не работает, подаче топлива управляет непосредственно водитель.

Двухрежимный регулятор обеспечивает регулирование частоты во всем диапазоне.

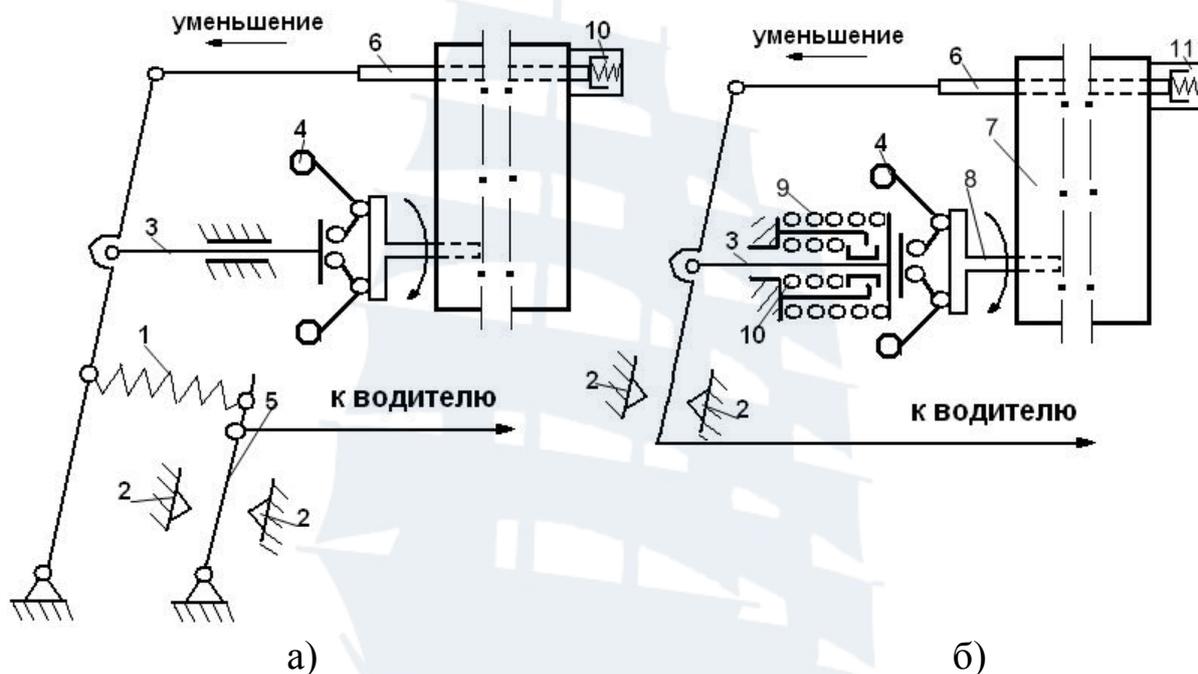


Рис. 3.15. Конструкция регуляторов частоты вращения дизельных двигателей:

- а – всережимный регулятор; б – двухрежимный регулятор;  
 1 – главная пружина; 2 – упор рычага; 3 – тяга с пятой; 4 – двуплечий рычаг с грузом; 5 – кулиса; 6 – рейка ТНВД; 7 – ТНВД; 8 – вал ТНВД;  
 9 – пружина наружная; 10 – пружина внутренняя; 11 – упор рейки

Принцип работы обеих конструкций основан на одном принципе: противодействие двух сил, с одной стороны – сила грузов 4, с другой – сила главной пружины 1 во всережимном регуляторе (в двухрежимном – сила наружной пружины 9). Грузы 4, вращаясь, под действием центробежной силы расходятся от центра вращения и через плечо рычага толкают главный рычаг 12 влево на уменьшение подачи топлива. А пружины 1 и 9 противодействуют этому и стремятся увеличить подачу топлива.

Например, при движении машины на спуске частота вращения двигателя увеличивается, соответственно увеличивается и частота вращения связанных с коленчатым валом вала ТНВД 8 и грузов 4. Грузы во всережимном регуляторе воздействуют через пята на рычаг 3 и на главный рычаг 12, перемещая его влево на уменьшение подачи топлива.

В двухрежимном регуляторе этому перемещению влево противодействует пружина 9, которая позволит перемещение только при высоких частотах вращения. То есть тогда, когда сила грузов станет настолько высокой, что ее будет достаточно для сжатия пружины 9.

При движении машины на подъем частота вращения уменьшается, уменьшается и частота вращения связанных с коленчатым валом вала ТНВД 8 и грузов 4. Центробежная сила грузов становится меньше силы растяжения главной пружины 1, которая уводит главный рычаг 12 на увеличение подачи топлива.

В двухрежимном регуляторе такой увод станет возможным только при очень сильном падении частоты, когда центробежная сила грузов уменьшится настолько, что силы предварительно сжатой пружины 10 станет достаточно для преодоления сил грузов 4. При этом произойдет разжатие пружины 10 и перемещение рычага 4, затем главного рычага 12 и рейки ТНВД 6 вправо на увеличение подачи топлива.

Для транспортных легковых и грузовых машин более выгодным является двухрежимный регулятор, обеспечивающий на 5-7 % меньший расход топлива. Однако в современных моделях применяют оба регулятора. Всережимный обеспечивает работу до частоты примерно  $3000 \text{ мин}^{-1}$ , двухрежимный – при более высоких частотах.

### ***3.2.4. Электронная система управления***

Электронная система управления дизеля с топливной системой определяет состояние двигателя (частоту вращения, положение дроссельной заслонки (педаль акселератора), температуру охлаждающей жидкости и т. д.) по сигналам датчиков и вычисляет количество цикловой подачи, угол опережения впрыска, давление топлива посредством компьютера системы управления.

Контроллер также имеет диагностическую и аварийную функции, которые осуществляют самодиагностику элементов и в случае необходимости предупреждают водителя о неисправности или работе в аварийном режиме, и переключает систему управления в аварийный режим работы, дающий возможность дальнейшей работы двигателя.

### 3.2.4.1. Принцип работы электронной системы

При рассмотрении система может быть разделена на топливную систему и систему управления. Схема топливной системы показана на рис. 3.16.

Давление от топливного насоса поступает в топливный коллектор и затем распределяется в цилиндры двигателя. Начало впрыска и его окончание управляется открытием и закрытием электромагнитного клапана форсунки.

Система управления может быть разделена на три условные части: датчики, электронный блок управления (компьютер) и исполнительные механизмы (пропорциональный электромагнит управляющей рейки ПЭМУР и электромагнит форсунки). Электронный блок управления использует сигналы от датчиков, установленных на двигателе и в трансмиссии, для вычисления времени (момента) подачи питания и продолжительности подачи питания на электромагнитный клапан форсунки, а также на ПЭМУР. Действие ПЭМУР в данной конструкции заменяет ранее рассмотренные механические регуляторы частоты вращения.

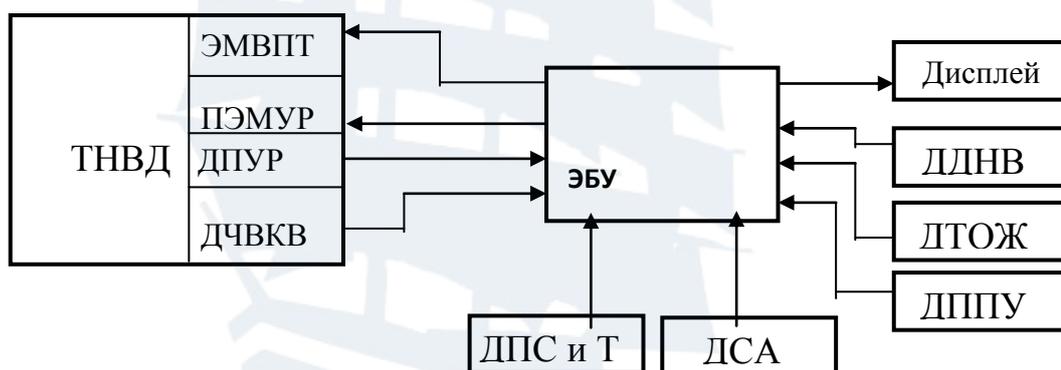


Рис. 3.16. Принципиальная схема электронной системы управления топливной системой дизеля:

- ЭМВПТ – электромагнит выключения подачи топлива;
- ПЭМУР – пропорциональный электромагнит управляющей рейки, перемещает рейку под действием сигналов от ЭБУ;
- ДПУР – датчик положения управляющей рейки;
- ДЧВКВ – датчик частоты вращения кулачкового вала;
- ЭБУ – электронный блок управления по данным от датчиков вырабатывает управляющие воздействия;
- ДР – диагностический разъем для подключения диагностической аппаратуры;
- Дисплей – для индикации оборотов двигателя и расхода топлива;
- ДДНВ – датчик давления наддувочного воздуха;
- ДТОЖ – датчик температуры охлаждающей жидкости;
- ДППУ – датчик положения педали управления двигателем;
- ДСА – датчик скорости автомобиля;
- ДПС и Т – датчик положения сцепления и тормоза

### 3.2.5. Работа системы (рис. 3.17)

Система впрыска состоит из топливного насоса 6, топливного коллектора (рампы) 8, форсунок 9, электронного блока управления 11, управляющего всеми этими частями и различными датчиками.

Топливный насос подает топливо под высоким давлением в топливный коллектор. Давление топлива регулируется изменением производительности насоса. Величина подачи управляется включением перепускного клапана, управляемого сигналами от электронного блока.

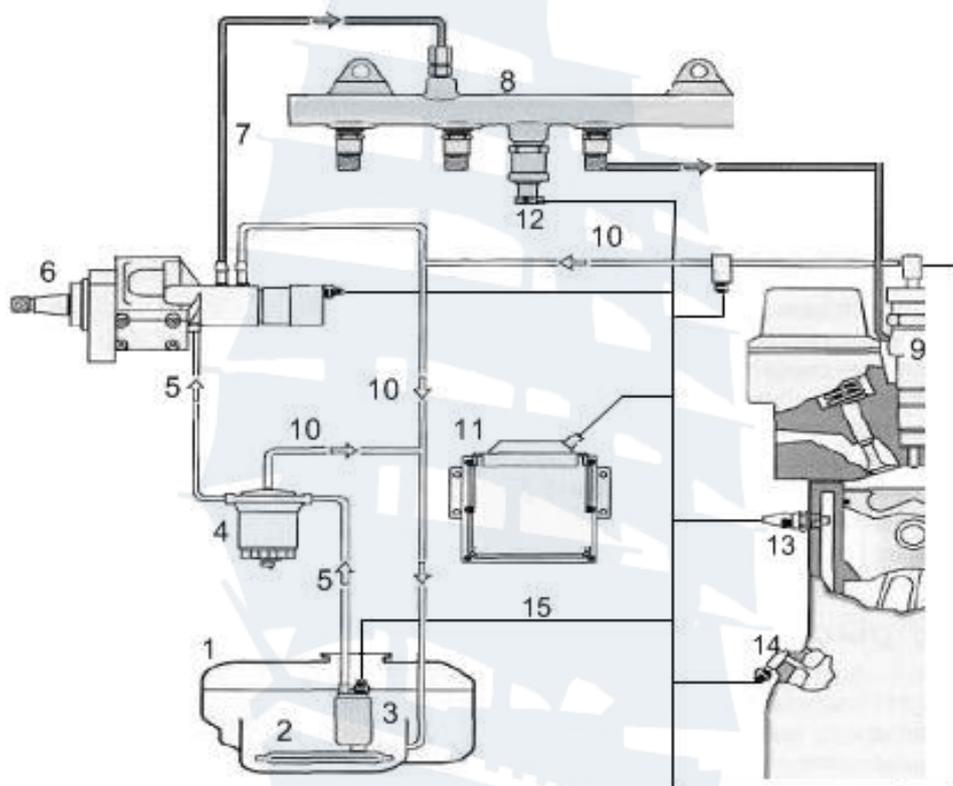


Рис. 3.17. Работа системы впрыска дизеля с электронным управлением:  
1 – топливный бак; 2 – топливоприемник; 3 – топливоподкачивающий насос;  
4 – фильтр тонкой очистки; 5 – трубопроводы низкого давления;  
6 – топливный насос высокого давления (ТНВД); 7 – трубопроводы высокого давления (топливные трубки); 8 – топливный коллектор (рампа);  
9 – форсунка; 10 – линии слива топлива (обратка); 11 – электронный блок управления (ЭБУ); 12 – клапан-регулятор; 13 – датчик температуры жидкости; 14 – датчик Холла; 15 – электрические линии

Топливный коллектор получает топливо под давлением, вырабатываемым топливным насосом 6, и распределяет его по цилиндрам двигателя. Давление топлива контролируется датчиком давления (регулятором) 12, установленным в топливном коллекторе.

Топливо под давлением из топливного коллектора 8 через топливные трубки 7 (трубопроводы высокого давления) поступает в форсунки 9. Форсунки управляют величиной цикловой подачи и углом опережения впрыска посредством включения-выключения управляющего клапана.

При подаче напряжения на обмотку клапана топливо вытекает из управляющей камеры через жиклер, игла распылителя поднимается, и начинается впрыск. При прекращении подачи напряжения на обмотку клапана давление топлива в управляющей камере повышается, игла движется вниз, и впрыск заканчивается.

Угол опережения впрыска определяется моментом (временем) подачи напряжения на обмотку управляющего клапана, а величина цикловой подачи управляется продолжительностью подачи напряжения на обмотку клапана

### **3.3. Топлива и их свойства**

#### ***3.3.1. Состав и свойства топлив***

В действительном цикле поршневых ДВС осуществляются физико-химические превращения рабочего тела, представляющего собой смесь окислителя, топлива и остаточных газов. Окислителем обычно служит кислород атмосферного воздуха.

Основными топливами являются бензины и дизельные топлива, получаемые путем переработки нефти и представляющие собой смеси различных углеводородов. Это насыщенные парафиновые углеводороды или алканы  $C_nH_{2n+2}$ ; олефины или алкены  $C_nH_{2n}$  (обычно присутствуют в топливах в незначительном количестве); нафтены или циклоалканы, имеющие формулу  $C_nH_{2n}$  (как и олефины), но только с другими связями между атомами углерода; ароматические углеводороды (в основном  $C_nH_{2n-6}$ ), характеризующиеся кольцевой молекулой. Используются также сжатые и сжиженные газы; синтетические топлива, получаемые переработкой угля, сланцев, битуминозных песков; спирты; эфиры (являющиеся изомерами спиртов) и др.

Свойства топлив можно разделить на физико-химические и эксплуатационные.

К *физико-химическим* относятся свойства, характеризующие состояние и состав топлив (плотность, вязкость, поверхностное натяжение, химический и фракционный составы и т. д.).

К эксплуатационным относятся свойства, обеспечивающие надежность работы и необходимые энергетические, экономические и экологические показатели двигателей (испаряемость, пусковые и низкотемпературные свойства, воспламеняемость, антидетонационные свойства и др.).

*Бензины.* Автомобильные бензины представляют собой смеси углеводородов, выкипающих в диапазоне температур 40-200 °С. В России вырабатываются бензины марок А-76, АИ-93 (АИ-92), А-95, АИ-98, а также бензин «Экстра», соответствующий марке АИ-95. Цифры в марке бензина показывают октановое число (ОЧ), которое характеризует детонационную стойкость бензинов. Оно численно равно содержанию (%) изооктана (ОЧ = 100) в смеси с Н-гептаном (ОЧ = 0), которая в условиях стандартного одноцилиндрового двигателя имеет такую же детонационную стойкость, как и испытуемый бензин.

Существует приближенная эмпирическая зависимость между ОЧ, обеспечивающим бездетонационную работу, степенью сжатия  $\varepsilon$  и диаметром цилиндра  $D$  (мм):  $ОЧ = 125,4 - 413 / \varepsilon + 0,183D$ . Наименьшей детонационной стойкостью обладают парафины, наибольшей – ароматические углеводороды. С увеличением количества атомов углеводорода в молекуле ОЧ уменьшается. Повышение ОЧ возможно путем добавок низкокипящих высокооктановых углеводородов (бутановая, изобутановая фракции и т. д.), антидетонационных присадок (в основном алкилсвинцовых – тетраэтила свинца и тетраметила свинца, а также металлокарбонатов, алкилгалогенидов) и кислородосодержащих компонентов (метилового спирта, метил-трет-бутилового эфира).

Испаряемость бензинов определяется в основном кривой фракционной разгонки (фракционным составом) и давлением насыщенных паров. Испаряемость влияет на пусковые свойства при низких температурах, склонность к образованию паровых пробок, скорость прогрева и приемистость двигателя. Существует эмпирическая зависимость, связывающая минимальную температуру воздуха при пуске  $t_n$ , температуры начала разгонки  $t_{нк}$  и выкипания  $t_{10}$  (10 % по объему):

$$t_n = 0,5t_{10} - 50,5 + (t_{нк} - 50)/3.$$

Для быстрого прогрева, хорошей приемистости и экономичности двигателя температура выкипания 50 % топлива по объему должна быть не выше  $t_{50} \approx 100-115$  °С, а 90 % по объему – не выше  $t_{90} \approx 160-180$  °С.

Важными свойствами бензинов являются также прокачиваемость, склонность к образованию отложений, коррозионная активность и др.

*Дизельные топлива.* Топлива для автомобильных и тракторных дизелей вырабатывают в основном из гидроочищенных фракций прямой перегонки нефти с добавлением легкого газойля каталитического крекинга. Дизельные топлива могут включать следующие группы углеводородов (%): нормальные парафиновые – 5-30, изопарафиновые – 18-46, нафтеновые – 23-60, ароматические – 14-35.

В России вырабатывают три сорта дизельного топлива:

«Л» (летнее) – для эксплуатации при температуре окружающего воздуха  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше, с температурой конца кипения  $t_{\text{кк}}$  не выше  $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

«З» (зимнее) – для эксплуатации при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше (температура застывания не выше  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и при  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше (температура застывания не выше  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

«А» (арктическое) – для температуры окружающего воздуха  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше.

Увеличение выпуска дизельных топлив возможно как путем повышения плотности (топлива утяжеленного фракционного состава УФС), так и путем одновременного снижения (топлива расширенного фракционного состава – РФС). Топлива типа УФС используются в качестве летних. С 1991 г. осуществляется опытное производство «городского» топлива (дизельное летнее экологически чистое топливо – ДЛЭЧТ по ТУ 38.1011348-90) с содержанием серы до 0,1 % и ароматических углеводородов до 20 %.

Для дизельных топлив наиболее важными эксплуатационными свойствами являются испаряемость, воспламеняемость, низкотемпературные свойства, прокачиваемость. Испаряемость определяется фракционным составом, плотностью и вязкостью топлив.

Для получения высоких мощностных и экономических показателей и малой токсичности отработавших газов (ОГ) фракционный состав должен находиться в следующих пределах:  $t = 125\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{90} \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для улучшения экологических свойств топлив необходимо также ограничивать содержание в топливе ароматических углеводородов (не более 15 %) и серы (0,05-0,15 %).

Воспламеняемость дизельных топлив оценивают цетановым числом (ЦЧ), которое определяют на одноцилиндровой установке ИТ9-3 сравнением испытуемого образца топлива со смесью цетана ( $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ , ЦЧ = 100) с  $\alpha$ -метилнафталином ( $\text{C}_{11}\text{H}_{10}$ , ЦЧ = 0), имеющей такой же период задержки воспламенения. Содержание цетана в та-

кой смеси (% по объему) есть цетановое число испытуемого топлива. Наибольшие ЦЧ имеют алканы, наименьшие – ароматические углеводороды. Углеводороды, имеющие высокие ЦЧ, обладают низкой детонационной стойкостью:

$$ЦЧ_{\sigma} = 60 - ОЧ / 2.$$

Повышение ЦЧ дизельного топлива, как правило, улучшает пусковые свойства двигателя.

Для надежной работы топливных систем дизелей важными являются низкотемпературные свойства, оцениваемые температурами помутнения (из топлива начинают выпадать твердые углеводороды), застывания (топливо теряет подвижность) и предельной температурой фильтруемости (при которой топливо после охлаждения еще способно проходить через фильтр с установленной скоростью).

Предельная температура фильтруемости обычно ниже температуры помутнения, но выше температуры застывания. Улучшение низкотемпературных свойств возможно как изменением состава и удалением *n*-парафиновых углеводородов (это сопровождается снижением ЦЧ), так и добавлением специальных (депрессорных) присадок.

Для дизельных топлив желательно иметь возможно меньшую склонность к нагарообразованию и образованию отложений и слоистых соединений, меньшую коррозионную активность. Эти свойства оцениваются такими свойствами топлив, как кислотность, содержание серы, коксуемость, зольность и др.

**Газообразные топлива.** Углеводородные газовые топлива при нормальных условиях подразделяют на сжатые (СПГ) и сжиженные (СНГ). В качестве сжатого газа обычно используют природный газ (95 % метана  $CH_4$ ). Метан, критическая температура которого  $t_{кр} = - 82 \text{ }^{\circ}C$ , при всех более высоких температурах находится в газовой фазе. Недостатком природных газов как топлива для ДВС является меньшая по сравнению с бензином и дизельным топливом теплота сгорания единицы объема (при атмосферных условиях).

Сжиженные газы являются главным образом продуктами переработки попутных газов и газов газоконденсатных месторождений и в основном содержат бутанпропановые и бутиленпропиленовые смеси, находящиеся при нормальной температуре в жидком состоянии. Объемная теплота сгорания несколько меньше, чем у жидких топлив (в 1,3-1,4 раза).

Некоторые свойства топлив даны в табл. 2.3.

## Свойства топлив

<i>Показатели</i>	<i>Бензин</i>	<i>Диз-топливо</i>	<i>СПГ</i>	<i>СНГ</i>	<i>Водород, H<sub>2</sub></i>
Плотность, кг/м <sup>3</sup> (кг/л)	750	860	0,71-0,75	(0,54)	0,086 (0,071)
Низшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	44	42,5	32,6-36,0	-	10,2
Октановое число, не менее	70-95	-	105	100	110
Массовая доля серы и сернистых соединений, %, не более	-	0,03	-	0,01	-

Основным преимуществом газовых топлив является их чистота (отсутствие свинца, оксидов металлов, ароматических углеводородов, очень низкое содержание серы и др.), более легкий запуск в холодное время, высокие экологические качества. Несмотря на меньшую плотность и теплоту сгорания газовых топлив, они вследствие высокой эффективности сжигания могут обеспечивать газовым двигателям по сравнению с бензиновыми большой КПД. Газовые топлива допускают применение более высоких степеней сжатия.

Перспективным топливом является водород, обладающий наиболее высокой теплотой и температурой сгорания и образующий «чистые» (не считая оксидов азота) продукты при сгорании. Недостатками водорода являются высокая стоимость получения, сложность хранения и заправки.

**Кислородосодержащие соединения.** К числу кислородосодержащих соединений относятся низшие и высшие спирты – метанол, этанол, пропанол и др.; эфиры – метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ) и др.; растительные масла.

К настоящему времени наибольшее применение нашли спирты, в частности метанол, который можно производить из угля, сланцев, древесины, биомассы и др. Все спирты имеют высокое ОЧ и целесообразны для применения в ДВС с искровым зажиганием. Таких недостатков спиртов, как низкая теплота сгорания, коррозионность, высокая теплота испарения, гигроскопичность и др., можно избежать используя их производные – эфиры; наибольшее применение как компонент автомобильных бензинов находит МТБЭ.

**Водотопливные эмульсии (ВТЭ).** Водотопливные эмульсии позволяют существенно снизить содержание сажи и оксидов азота в ОГ и повысить эффективность использования утяжеленных дизельных топлив. ВТЭ можно разделить на два типа: «вода в топливе» и «топливо в воде». На практике обычно используют эмульсии типа «вода в топливе», когда вода, являющаяся внутренней фазой, составляет 10-40 % по объему. Капли воды в таких эмульсиях представляют собой правильные сферы размером 2-5 мкм.

Особенностями сгорания водотопливных эмульсий являются снижение температуры пламени и повышение полноты сгорания, в основе чего лежит улучшение смесеобразования топлива с воздухом при возникновении «микровзрывов» капель воды. Недостатками ВТЭ являются невозможность их использования при низких температурах и способность к расслоению.

**Синтетические топлива.** Такие топлива применяют как в чистом виде, так и в качестве добавок к углеводородным топливам. Наиболее дешевым источником их получения является каменный уголь, из которого посредством различных технологических процессов получают синтетические бензины и дизельные топлива, метанол и др. Эти топлива отличаются меньшее (по отношению к дизельному) содержание водорода (9-12 %), большее содержание серы и соединений азота, повышенные температуры застывания, меньшую теплоту сгорания.

#### 4. СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

**Система зажигания** предназначена для воспламенения рабочей смеси в цилиндрах бензиновых двигателей. Основными требованиями к системе зажигания являются:

1. Обеспечение искры в нужном цилиндре (находящемся в такте сжатия) в соответствии с порядком работы цилиндров.

2. Своевременность момента зажигания. Искра должна происходить в определенный момент (момент зажигания) в соответствии с оптимальным при текущих условиях работы двигателя углом опережения зажигания, который зависит, прежде всего, от оборотов двигателя и нагрузки на двигатель.

3. Достаточная энергия искры. Количество энергии, необходимое для надежного воспламенения рабочей смеси, зависит от состава, плотности и температуры рабочей смеси.

Общим условием для системы зажигания является ее надежность (обеспечение непрерывности искрообразования).

По способу прерывания тока первичной цепи батарейные системы зажигания подразделяются на контактные, контактно-транзисторные и бесконтактные транзисторные.

#### 4.1. Принцип действия контактной системы зажигания

**Контактная система зажигания** (рис. 4.1) включает в себя основные элементы: аккумуляторную батарею 17, выключатель зажигания 8, добавочный резистор 9, катушку зажигания 12, прерыватель тока «кулачок» 4 и контакты, конденсатор 6, распределитель тока высокого напряжения 20, свечи 25, провода низкого и высокого напряжения.

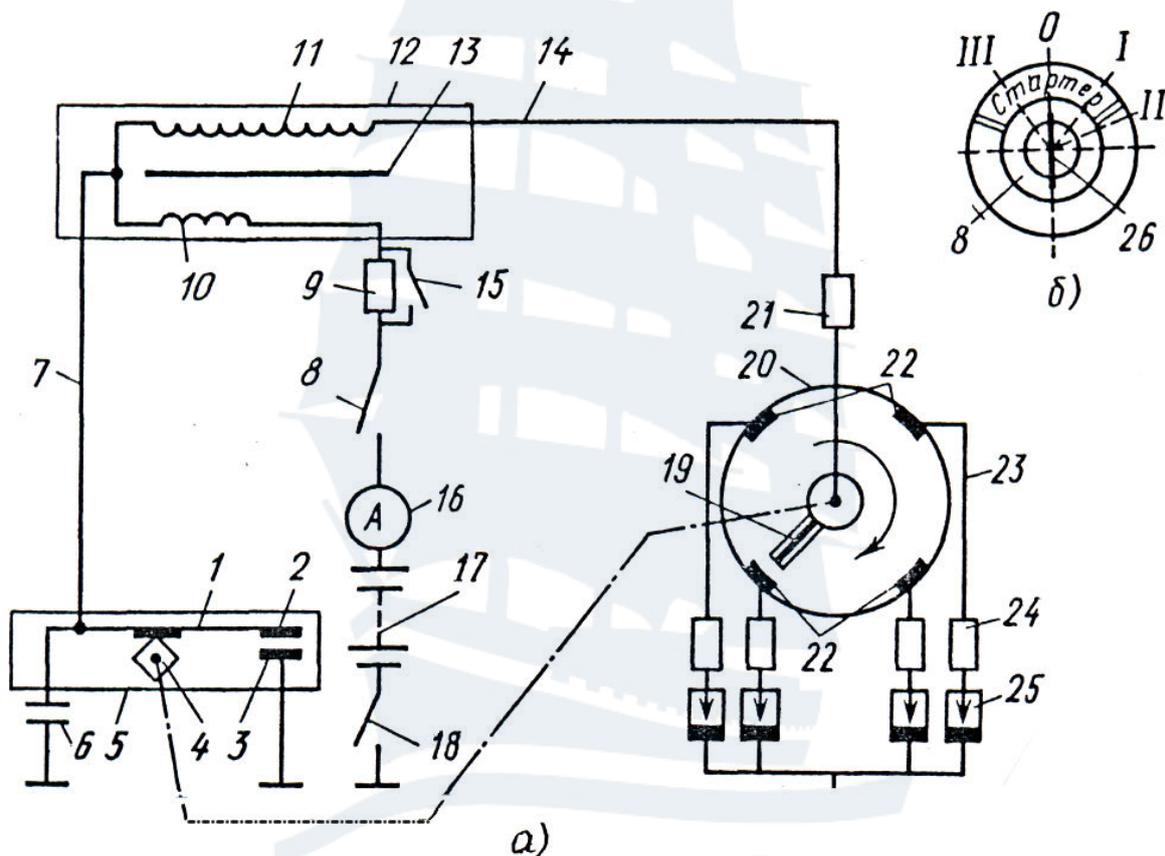


Рис. 4.1. Схема контактной системы зажигания:

а – схема; б – положение выключателя зажигания;

1 – рычажок прерывателя; 2 – подвижный контакт; 3 – неподвижный контакт; 4 – «кулачок»; 5 – прерыватель; 6 – конденсатор; 7, 14, 23 – провода; 8 – выключатель зажигания; 9 – добавочный резистор; 10 – первичная обмотка;

11 – вторичная обмотка; 12 – катушка зажигания; 13 – магнитопровод;

15 – выключатель резистора; 16 – амперметр; 17 – аккумуляторная батарея

(АКБ); 18 – выключатель АКБ; 19 – ротор; 20 – распределитель;

12, 24 – резисторы; 22 – электроды; 25 – свеча зажигания;

26 – выключатель зажигания

Прерыватель и распределитель тока высокого напряжения входят в один прибор, который называется распределителем зажигания.

В системе зажигания имеется цепь низкого напряжения (первичная цепь) и цепь высокого напряжения (вторичная цепь).

В цепь низкого напряжения входят источники тока низкого напряжения (аккумуляторная батарея и генератор), выключатель зажигания *18*, добавочный резистор *9*, первичная обмотка катушки зажигания *10*, прерыватель тока *5*, конденсатор и провода низкого напряжения.

В цепь высокого напряжения входят вторичная обмотка катушки зажигания *11*, распределитель тока высокого напряжения *20*, свечи и провода высокого напряжения.

При включенном зажигании и замкнутых контактах прерывателя по первичной цепи проходит ток низкого напряжения: вывод "+" аккумуляторной батареи, выключатель зажигания, добавочный резистор, первичная обмотка катушки зажигания, замкнутые контакты прерывателя, масса, вывод "-" аккумуляторной батареи.

Ток, проходя по первичной обмотке катушки зажигания, создает вокруг ее витков магнитное поле, в котором оказываются витки и вторичной обмотки. При размыкании контактов прерывателя ток в первичной цепи прекращается, вследствие чего исчезает магнитное поле катушки зажигания. Исчезая (сворачиваясь), магнитные силовые линии пересекают витки вторичной обмотки и индуцируют в каждом из них небольшую ЭДС. Поскольку число витков вторичной обмотки большое (порядка 15-20 тыс.), то напряжение на концах вторичной обмотки катушки зажигания достигает 15-20 кВ и более.

Через центральный провод, распределитель тока и провод свечи ЭДС высокого напряжения подводится к электродам свечи, между которыми и происходит искровой разряд, воспламеняющий рабочую смесь в цилиндре двигателя. В дальнейшем при размыкании и замыкании контактов прерывателя в строго определенные моменты этот процесс повторяется, обеспечивая воспламенение смеси в соответствии с порядком и режимом работы цилиндров двигателя.

При размыкании контактов прерывателя исчезающее магнитное поле пересекает и витки первичной обмотки катушки зажигания, индуцируя в ней ЭДС самоиндукции порядка 250-300 В, что вызывает сильное искрение контактов и приводит к значительному уменьшению вторичного напряжения.

Для уменьшения искрения контактов прерывателя и повышения вторичного напряжения параллельно контактам прерывателя ставят конденсатор.

Контактная система зажигания имеет слабый узел – контакты прерывателя, которые ограничивают увеличение тока в первичной цепи, а, следовательно, и повышение вторичного напряжения. Контакты прерывателя в процессе эксплуатации окисляются и быстро разрушаются, что вызывает частые отказы в работе системы зажигания.

Таким образом, основным недостатком контактной системы зажигания является наличие контактного узла, который понижает надежность и долговечность работы системы зажигания, а также ограничивает силу тока в первичной цепи, а следовательно, магнитный поток катушки и вторичное напряжение. Поэтому на смену контактной системе зажигания пришли новые контактно-транзисторные и бесконтактные транзисторные системы зажигания, которые частично или полностью лишены недостатков, присущих контактным системам зажигания.

#### **4.2. Принцип действия контактно-транзисторной системы**

В состав контактно-транзисторной системы зажигания входят все элементы контактной системы (кроме конденсатора) и дополнительно – транзисторный коммутатор, который на рис. 4.2 представлен транзистором типа *p-n-p*, включенным последовательно в первичную цепь.

*При включенном зажигании и замкнутых контактах* прерывателя через последние на базу транзистора 21 подается отрицательный потенциал, вследствие чего транзистор открывается, и по первичной цепи проходит ток: вывод «+» аккумуляторной батареи – выключатель зажигания 17 – добавочный резистор 14 – первичная обмотка катушки зажигания 4 – переход эмиттер-коллектор транзистора 21 – масса-вывод «-» аккумуляторной батареи.

Небольшой ток управления транзистором от эмиттера идет на базу, а затем через замкнутые контакты прерывателя – на массу и на вывод «-» аккумуляторной батареи.

*При размыкании контактов* цепь управления транзистором прерывается, вследствие чего транзистор закрывается и во вторичной обмотке катушки зажигания индуцируется ЭДС высокого напряжения, достаточная для пробоя зазора между электродами свечи и воспламенения рабочей смеси в цилиндре двигателя.

В дальнейшем при размыкании и замыкании контактов прерывателя процессы работы системы зажигания повторяются.

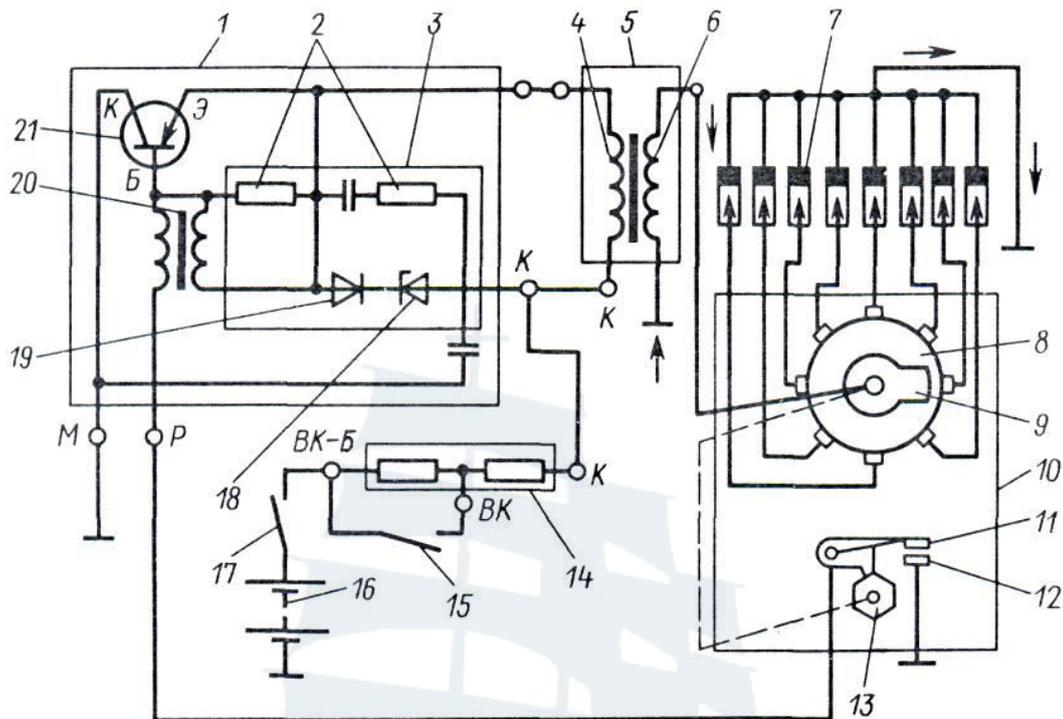


Рис. 4.2. Схема контактно-транзисторной системы зажигания (стрелками указана цепь высокого напряжения):

1 – транзисторный коммутатор; 2 – резисторы; 3 – блок защиты транзистора; 4 – первичная обмотка; 5 – катушка зажигания; 6 – вторичная обмотка; 7 – свечи зажигания; 8 – крышка; 9 – ротор с электродом; 10 – распределитель зажигания; 11 – подвижный контакт; 12 – неподвижный контакт; 13 – кулачок прерывателя; 14 – добавочные резисторы; 15 – выключатель добавочного резистора; 16 – аккумуляторная батарея; 17 – выключатель зажигания; 18 – стабилитрон; 19 – диод; 20 – импульсный трансформатор; 21 – германиевый транзистор; К, Б, Э – электроды транзистора (коллектор, база, эмиттер)

Использование транзисторного коммутатора дало возможность облегчить работу контактов прерывателя, поскольку через них проходит не весь ток первичной цепи, а лишь малый ток управления транзистором (до 1 А).

Прерывание тока в первичной цепи с помощью транзистора дало возможность повысить вторичное напряжение за счет увеличения тока первичной цепи и долговечности работы контактов прерывателя.

Однако контактно-транзисторная система зажигания не лишена недостатков, присущих контактной системе зажигания. Такие явления, как износ контактов и «кулачка», вибрация и окисление контактов, ослабление упругости пружины подвижного контакта, остаются

характерными и для контактно-транзисторных систем зажигания. Поэтому более перспективной является бесконтактная транзисторная система зажигания, в которой недостатки выше рассмотренных систем зажигания отсутствуют.

#### **4.3. Принцип действия бесконтактной системы зажигания**

*Бесконтактная транзисторная система зажигания* включает в себя те же основные элементы, что и контактно-транзисторная, но вместо контактов прерывателя применен бесконтактный магнитоэлектрический датчик (датчик импульсов). Управление транзистором в режимах «открыт» и «закрит» осуществляется с помощью датчика импульсов, который представляет собой генератор переменного тока малых размеров. Ротор датчика (постоянный многополюсный магнит) получает привод, как и кулачок прерывателя, от шестерни распределительного вала.

#### **4.4. Устройство приборов системы зажигания**

*Катушка зажигания* предназначена для преобразования тока низкого напряжения (аккумуляторной батареи, генератора) в ток высокого напряжения порядка 15-30 кВ. По исполнению катушки бывают экранированные и неэкранированные.

Катушка зажигания включает в себя сердечник, вторичную обмотку ( $w = 41$  тыс. витков), первичную обмотку ( $w = 180$  витков), магнитопровод, кожух (корпус), крышку с тремя выводными клеммами, фарфоровый изолятор. Свободное пространство внутри катушки зажигания заполнено трансформаторным маслом, что улучшает изоляцию обмоток и отвод тепла от них.

Первичная и вторичная обмотки выполнены из медного провода соответственно 1,25 мм и 0,06 мм. Один конец вторичной обмотки соединен с корпусом, а второй – с клеммой высокого напряжения.

#### ***Прерыватель-распределитель зажигания***

*Распределитель зажигания* служит для периодического размыкания цепи низкого напряжения и распределения тока высокого напряжения по свечам в соответствии с порядком и режимом работы двигателя. Приводится в действие от шестерни распределительного вала.

К распределителю тока высокого напряжения относятся: ротор с токоразносной пластиной, крышка распределителя с клеммами для проводов и с угольным электродом снижения радиопомех.

Крышка фиксируется в определенном положении с помощью выступа на ней и паза на корпусе распределителя.

### ***Опережение зажигания***

Для получения наибольшей мощности и экономичности двигателя необходимо подавать искру в цилиндр в такой момент, чтобы максимальное давление от сгорания достигалось при нахождении поршня в положении  $10-20^\circ$  после ВМТ. Поскольку от момента подачи искры в цилиндр до интенсивного горения проходит некоторое время, то подавать искру необходимо еще до прихода поршня в ВМТ, т. е. с определенным *углом опережения зажигания*, на который повернется кривошип коленчатого вала с момента подачи искры в цилиндр до прихода поршня в ВМТ. В зависимости от режима работы двигателя оптимальный угол опережения зажигания изменяется в пределах от  $5$  до  $50^\circ$ .

При позднем воспламенении смеси (малом угле опережения зажигания) двигатель перегревается, ухудшается его экономичность, снижается мощность.

При слишком раннем воспламенении смеси (большом угле опережения зажигания) значительное давление в цилиндре достигается еще до прихода поршня в ВМТ, что приводит к снижению мощности двигателя, ускоренному износу кривошипно-шатунного механизма и возникновению стуков при работе двигателя.

Величина оптимального угла опережения зажигания зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя, нагрузки на двигатель, октанового числа топлива и конструктивных особенностей двигателя. Для учета этих факторов в распределителе зажигания имеются центробежный и вакуумный регуляторы опережения зажигания, а также октан-корректор.

*Свеча зажигания* преобразует импульсы высокого напряжения в искровой разряд в камере сгорания. По конструкции (рис. 4.3) свечи зажигания отличаются незначительно.

Для нормальной работы свечи температура нижней части изолятора должна быть  $500-600^\circ\text{C}$ . При температуре меньше  $500^\circ\text{C}$  возможно отложение нагара на изоляторе свечи, что может вызвать перебои в работе, а при температуре изолятора более  $600^\circ\text{C}$  возможно калильное зажигание (воспламенение смеси от температуры изолятора свечи).

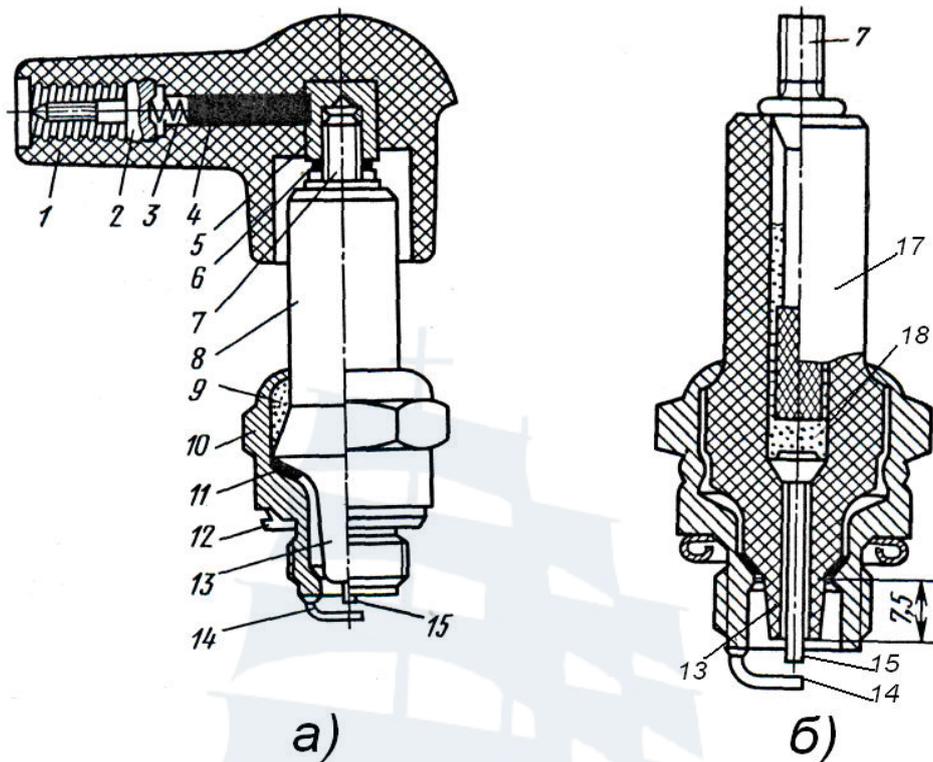


Рис. 4.3. Свеча зажигания:

*а* – устройство; *б* – разрез; 1 – корпус; 2 – вывод; 3 – пружина; 4 – резистор; 5 – контакт; 6, 11, 12 – шайбы; 7 – верхний конец центрального электрода; 8, 17 – изолятор; 9 – порошок; 10 – корпус; 13 – юбка; 14 – боковой электрод; 15 – центральный электрод; 18 – стеклогерметик

Калильное зажигание недопустимо, так как приводит к увеличению нагрузки на детали кривошипно-шатунного механизма, детонации и перегреву двигателя. Поэтому необходимо устанавливать свечи зажигания, рекомендуемые заводами-изготовителями.

Тепловая характеристика свечи выражается калильным числом, величина которого выбирается заводами из чисел, определенных ГОСТом. Чем выше калильное число, тем свеча более «холодная», и наоборот.

Принцип действия свечи: при подаче импульса тока высокого напряжения с вторичной обмотки катушки зажигания электрический потенциал накапливается на центральном электроде 15 (рис. 4.3). Как только мощность потенциала достигнет определенной величины, происходит пробой воздушного зазора (замыкание цепи на массу через боковой электрод 14) и, как следствие, возникает искра.

Условное обозначение (маркировка) свечей зажигания состоит в следующем. Буквы А и М обозначают размер резьбы на корпусе свечи в мм (А - М14 х 1,25; М - М18 х 1,5); число за буквой – калильное чис-

ло свечи (8, 10, 11, 14 и т. д.), буквы Н и Д – длину резьбовой части корпуса (Н = 11 мм, Д = 19 мм); буква В входит в маркировку в том случае, если тепловой конус изолятора выступает за торец корпуса свечи; буква Т указывает на то, что герметизация между центральным электродом и изолятором достигается с помощью термоцемента.

Длина резьбовой части корпуса 12 мм и другие виды герметика в маркировке свечей не указываются. Например, условное обозначение свечи АНН указывает, что размер резьбы на корпусе свечи М 14 х 1,25, калильное число равно 10, длина резьбовой части корпуса равна 11 мм. Конус изолятора не выступает за торец корпуса свечи.

Зазор между электродами свечей находится в пределах от 0,5 до 1,0 мм. Однако для каждого типа системы зажигания и для каждой свечи устанавливается определенный зазор, который достигается подгибанием бокового электрода свечи. Отклонение зазора между электродами от установленной величины приводит к перебоям и отказам в работе свечи.

В системах зажигания с транзисторным коммутатором используются датчики трех типов:

– **датчик Холла** (такая модификация системы называется *TI-h*) содержит пластинку кремния, к двум боковым граням которой приложено небольшое напряжение. Если пластинку поместить в магнитное поле, то на двух других гранях пластинки также появится напряжение. В этом состоит эффект Холла.

Изменение магнитного поля вызовет изменение напряжения Холла, которое можно использовать для управления коммутатором. Магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом, может прерываться лопастями обтюратора, вращающегося на валу распределителя зажигания.

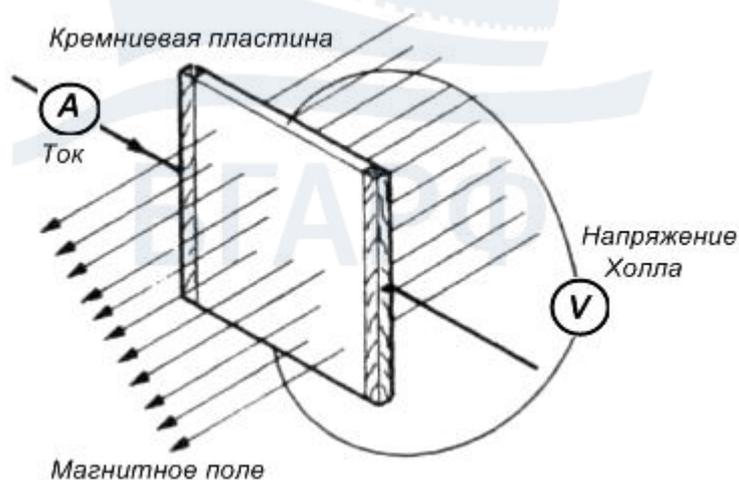


Рис. 4.4. Схема эффекта Холла

Через кремниевую пластинку пропускается магнитный поток, напряжение Холла составляет около 2 мВ, увеличиваясь с ростом температуры. Пластинка обычно составляет одно целое с интегральной схемой, осуществляющей усиление и формирование сигнала.

При открытом зазоре между постоянным магнитом и датчиком Холла пластинка выдает напряжение. Если зазор перекрывается лопастью обтюратора, магнитное поле замыкается через лопасть и не попадает на пластинку Холла. Напряжение при этом падает.

Сигнал с граней пластинки попадает в усилитель и формирователь импульсов, после чего он может управлять коммутатором (включением и выключением катушки).

– **индуктивный датчик** (такая модификация системы называется *TI-i*) – включает в себя постоянный электромагнит с обмоткой и зубчатый диск. При вращении диска магнитное поле замыкается либо через зуб, либо через впадину. Магнитный поток, проходящий через обмотку, то увеличивается, то уменьшается, в результате чего в обмотке индуцируется ЭДС переменного знака. Сигналы датчика проходят через формирователь импульсов и поступают в коммутатор для управления первичной обмоткой катушки зажигания.

При увеличении скорости возрастает частота импульсов, а также само выходное напряжение датчика – от долей вольта до сотни вольт.

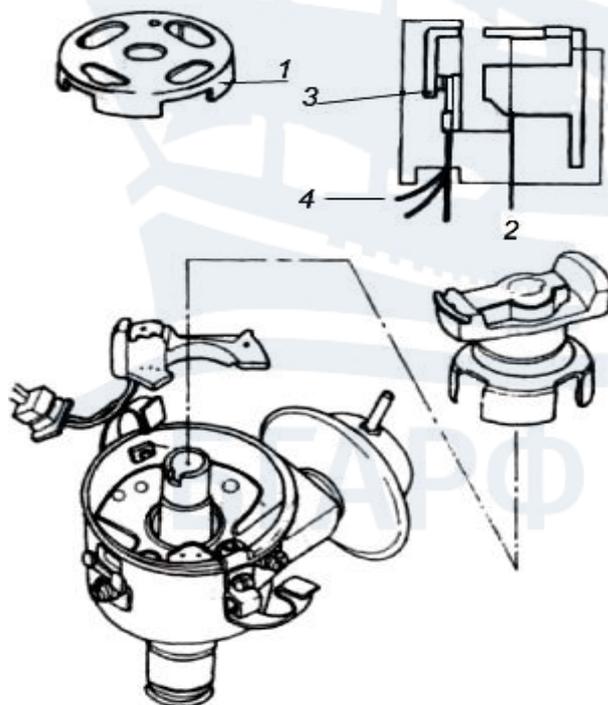


Рис. 4.5. Конструкция генератора Холла:  
1 – обтюратор с лопастями; 2 – постоянный магнит;  
3 – чувствительный элемент; 4 – провода датчика

**Оптический датчик** (такая модификация системы называется **ТИ-о**) – представляет из себя сегментированный диск, закрепленный на валу распределителя, который перекрывает инфракрасный луч, направленный на фототранзистор.

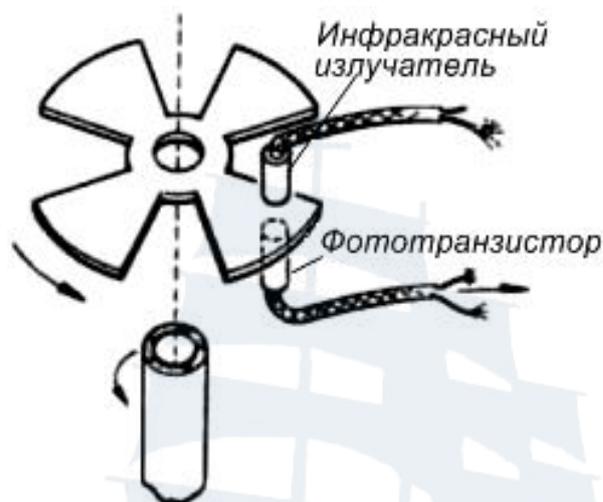


Рис. 4.6. Оптический датчик

В течение промежутка времени, пока фототранзистор освещен, через первичную обмотку катушки идет ток. Когда диск перекрывает луч, датчик посылает в коммутатор импульс, который прерывает ток в катушке и таким образом генерирует искру. Существует несколько разновидностей такого рода устройств: запуск искры может происходить как при открытии, так и наоборот, при закрытии светового источника. Обычно такие генераторы задают постоянный угол включенного состояния катушки, но качество зажигания от этого не страдает, поскольку на это не оказывает влияние динамика подвижного контакта и он остается всегда постоянный, независимо от скорости.

Датчик-генератор импульсов, как правило, конструктивно располагается внутри распределителя зажигания (конструкция самого распределителя от контактной системы не отличается) – поэтому узел в целом называют **«датчик-распределитель»**.

Одна из модификаций этой системы с механическим распределителем и катушкой зажигания, отдельно стоящей от распределителя и коммутатора, получила устоявшееся название **«бесконтактная система зажигания (БСЗ)»**. Общая схема бесконтактной системы зажигания приведена на рис. 4.7.

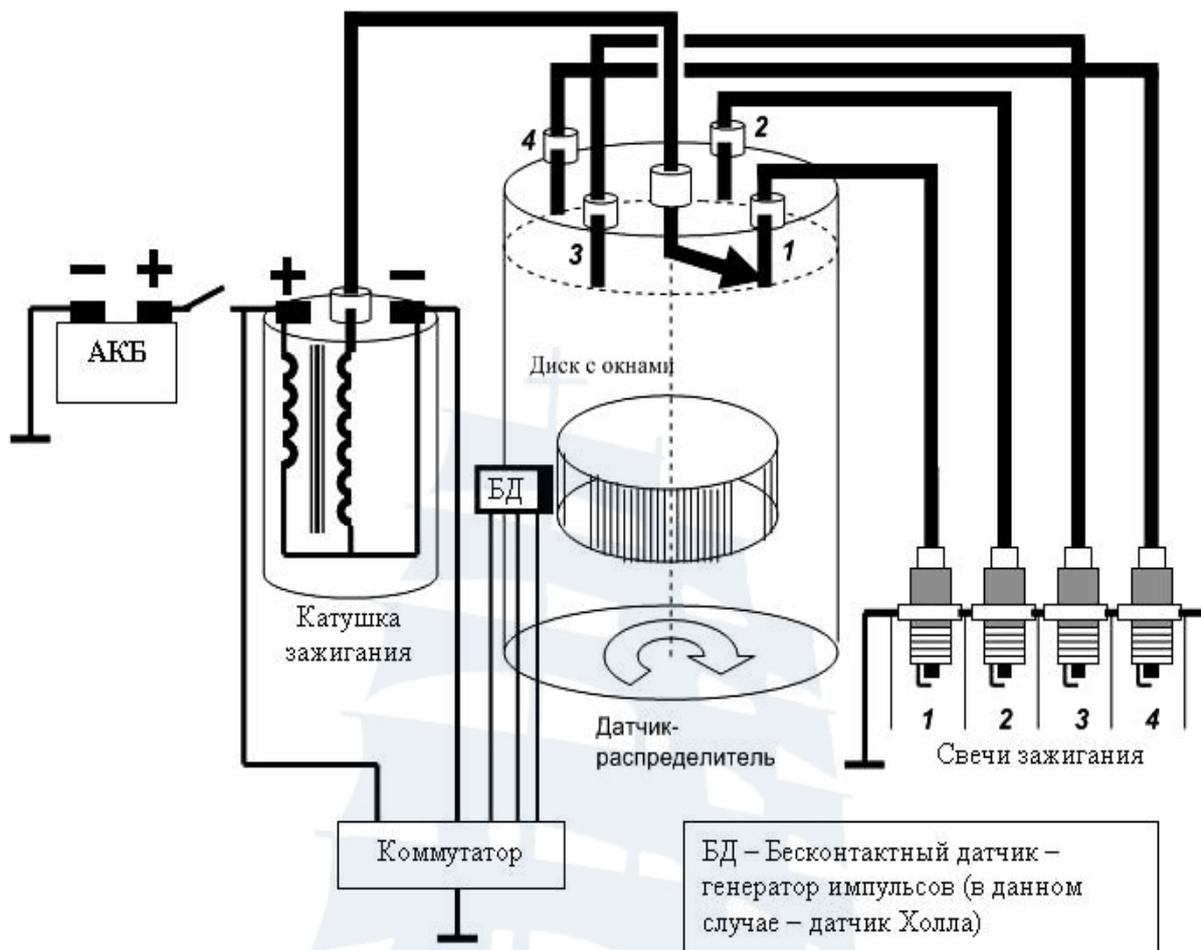


Рис. 4.7. Принципиальная схема современной наиболее распространенной системы зажигания с датчиком Холла

**Коммутатор** управляет замыканием первичной цепи катушки зажигания на массу. При этом коммутатор не просто разрывает первичную цепь по сигналу с импульсного датчика – коммутатор должен обеспечить предварительную зарядку катушки необходимой энергией. То есть, до управляющего импульса с датчика, коммутатор должен предугадать, когда нужно замкнуть катушку на землю для того, чтобы её зарядить.

Причём, он должен это сделать так, чтобы время заряда катушки было приблизительно постоянным (достигался максимум накопленной энергии, но не допускался перезаряд катушки). Для этого коммутатор вычисляет период импульсов приходящих с датчика. И в зависимости от этого периода, вычисляет время начала замыкания катушки на землю. Чем выше обороты двигателя, тем раньше коммутатор начнет замыкать катушку на землю, но время замкнутого состояния будет одинаковым.

Естественно, существует множество модификаций данной системы – с применением других типов датчиков, с применением нескольких датчиков и пр.

**Микропроцессорный блок управления зажиганием** (или блок управления двигателем с подсистемой управления зажиганием) – с датчиками и коммутатором. Системы зажигания, в которых применяется такой вариант управления зажиганием имеют общее название – микропроцессорные системы зажигания (рис. 4.8).



*Рис. 4.8. Принципиальная схема системы зажигания с датчиком Холла и управлением от электронного блока*

В этом случае блок управления получает информацию о работе двигателя (обороты, положение коленчатого вала, положение распределительного вала, нагрузка на двигатель, температура охлаждающей жидкости и пр.) от датчиков и по результатам алгоритмической обработки этих данных управляет коммутатором, который, в свою очередь, управляет накопителем энергии. Регулировка опережения зажигания реализована программно в блоке управления. Коммутаторы в микропроцессорных системах зажигания также называются «воспламенитель» (igniter).

**Электронный блок управления (ЭБУ, ECU, РСМ)** – именно он выполняет в системе главную роль. Его работа состоит в сборе информации от датчиков (для управления зажиганием основными датчиками являются датчик положения коленчатого вала, датчик положения распределительного вала, датчик детонации, датчик угла открытия дроссельной заслонки), расчете оптимального момента зажигания и времени зарядки катушки и конкретно управление через коммутатор первичной цепью катушки.

На современных автомобилях блок управления системой зажигания объединен с блоком управления впрыском топлива.

Кратко рассмотрим *основные датчики микропроцессорной системы* управления зажиганием.

**Датчики положения коленчатого и распределительного вала.** Эти датчики необходимы ЭБУ для определения текущих оборотов двигателя, а также текущего положения распределительного вала (для идентификации цилиндра, который находится в такте сжатия). В разных модификациях электронных систем управления используется разный набор датчиков для решения этих задач. При этом также используются датчики разных типов – но наиболее часто индуктивные датчики и датчики Холла.

**Датчик детонации** – устанавливается на блоке двигателя. Во время работы двигателя датчик генерирует сигнал с частотой и амплитудой, зависящей от частоты и амплитуды вибрации двигателя. При возникновении детонации электронный блок корректирует угол опережения зажигания.

**Датчик угла открытия дроссельной заслонки** – определяет нагрузку на двигатель.

**Коммутатор («воспламенитель», igniter)** – это транзисторные ключи, которые в зависимости от сигнала с ЭБУ включают или отключают питание первичной обмотки катушки (катушек) зажигания. В зависимости от устройства конкретной системы зажигания коммутатор может быть как один, так их может быть и несколько (если в системе зажигания используется несколько катушек). Существует несколько типов систем с разным расположением ключей:

- ключи объединены в один блок с ЭБУ;
- ключи стоят отдельно для каждой катушки и не объединены ни с ЭБУ, ни с катушками;
- ключи объединены в отдельный блок, но стоят отдельно и от ЭБУ и от катушек;

– ключи объединены с катушками соответствующих цилиндров (особенно характерно для системы СОР – см. далее).

Микропроцессорная система управления зажиганием может применяться практически с любыми модификациями систем накопления и распределения энергии.

**1. Накопитель энергии.** Накопители энергии, используемые в системах зажигания, делятся на *две группы*:

**Первая группа. С накоплением энергии в индуктивности – катушка или катушки зажигания** (разг. бобина, англ. ignition coil, inductor). В этом случае энергия накапливается в первичной обмотке катушки зажигания и при размыкании первичной цепи во вторичной цепи индуцируется высокое напряжение, подаваемое на свечи. Это наиболее распространенная система.

Простейшая катушка зажигания имеет три клеммы (рис. 4.9):

– **на первую** подается питание (+ 12 В) от выключателя зажигания. Эта клемма соединена с первичной обмоткой катушки;

– **на вторую** коммутируется масса автомобиля через цепи управления накоплением энергии.

В классической системе зажигания эта клемма соединена с массой через контактный прерыватель зажигания. В момент прокрутки распределителя зажигания, когда бегунок находится между контактами токосъемника распределителя, происходит замыкание прерывателя на землю, через первичную обмотку катушки начинает течь ток – идёт накопление энергии в катушке. В момент прохода бегунка распределителя над токосъёмником свечи, контакт прерывателя и, соответственно, цепь первичной обмотки катушки размыкается.

При этом во вторичной обмотке и высоковольтном выходе катушки индуцируется ток высокого напряжения (до 25 кВ), а в первичной обмотке ток самоиндукции (не менее 250 В). В более современных системах первичная цепь катушки управляется транзисторными коммутаторами, которые, в свою очередь, управляются либо непосредственно бесконтактными датчиками положения распределительного вала, либо микропроцессорными блоками управления;

– **третья** клемма – высоковольтный выход катушки, соединенный со вторичной обмоткой. С этой клеммы высоковольтное напряжение в системе зажигания с одной катушкой поступает в распределитель зажигания; в системах зажигания с несколькими катушками – непосредственно на свечи зажигания (через высоковольтные провода или без них).



Рис. 4.9. Принципиальная схема катушки зажигания

В одном из популярных, особенно на японских и американских автомобилях, типе системы зажигания катушка зажигания объединяется в одном корпусе с распределителем зажигания (иногда также и с коммутатором и датчиками положения коленчатого и распределительного вала). Системы зажигания такого типа получили названия «катушка в распределителе» (*CID – Coil In Distributor*), «катушка в крышке распределителя» (*CIC – Coil in Cap*) и «система зажигания высокой энергии» (*HEI – High Energy Ignition*). Центральный провод, соединяющий катушку зажигания с распределителем в этой системе недоступен. Как правило, такая система устанавливается уже на автомобили с микропроцессорной системой управления.

В зависимости от применяемой на конкретном авто системы распределения высоковольтной энергии на автомобиле могут устанавливаться не одна, а несколько катушек зажигания.

**Вторая группа. С накоплением энергии в емкости – конденсаторе.** В этом случае энергия накапливается в конденсаторе, а в необходимый момент проходит через катушку зажигания как через трансформатор. Во вторичной цепи также индуцируется высокое напряжение, подаваемое на свечи. Такое устройство накопителя энергии получило аббревиатуру *CDI – Capacitor Discharge Ignition* («зажигание от разряда конденсатора») или *конденсаторное зажигание*, или *тиристорное зажигание* (по названию радиоэлемента, выполняющего функции коммутации). На автомобилях эта система исполь-

зуется, но не широко (широко эта система применяется на мотоциклах, гидроциклах, скутерах и пр.). Отличительным преимуществом данной системы является то, что энергия искры не зависит от оборотов двигателя и пр.

**2. Система распределения зажигания.** На автомобилях применяются два типа систем распределения – системы с механическим распределителем и системы статического распределения.

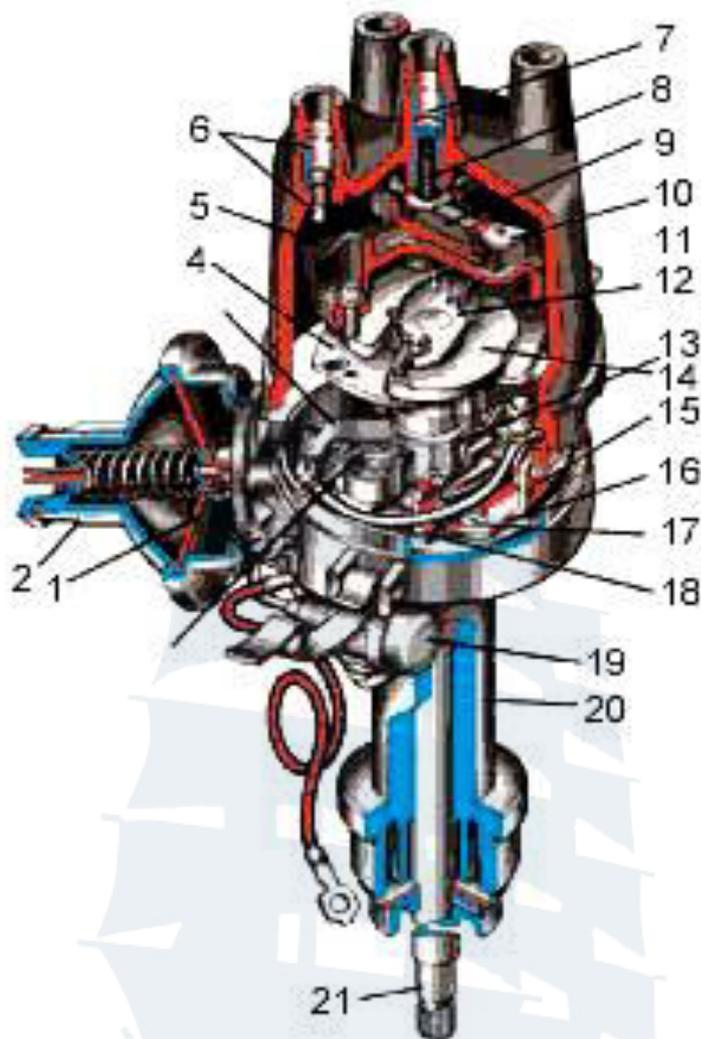
*Системы с механическим распределителем энергии.*

*Распределитель зажигания, трамблер* (англ. distributor, нем. ROV – Rotierende hochspannungs Verteilung) – распределяет высокое напряжение по свечам цилиндров двигателя. На контактных системах зажигания, как правило, объединен с прерывателем, на бесконтактных – с датчиком импульсов, на более современных либо отсутствует, либо объединен с катушкой зажигания, коммутатором и датчиками (системы HEI, CID, CIC).

После того, как в катушке зажигания образовался ток высокого напряжения, он попадает (по высоковольтному проводу) на центральный контакт крышки распределителя, а затем через подпружиненный контактный уголек на пластину ротора (рис. 4.10). Во время вращения ротора ток «соскакивает» с его пластины, через небольшой воздушный зазор, на боковые контакты крышки. Далее, через высоковольтные провода, импульс тока высокого напряжения попадает к свечам зажигания.

Боковые контакты крышки распределителя пронумерованы и соединены высоковольтными проводами со свечами цилиндров в определенной последовательности. Этим устанавливается «порядок работы цилиндров», который выражается рядом цифр. Как правило, для четырехцилиндровых двигателей, применяется последовательность: 1 – 3 – 4 – 2. Это означает, что после воспламенения рабочей смеси в первом цилиндре, следующая «вспышка» произойдет в третьем, потом в четвертом и, наконец, во втором цилиндре.

Такой порядок работы цилиндров установлен для равномерного распределения нагрузки на коленчатый вал двигателя.



*Рис. 4.10. Прерыватель-распределитель:*

- 1 – диафрагма вакуумного регулятора; 2 – корпус вакуумного регулятора;  
 3 – тяга; 4 – опорная пластина; 5 – ротор распределителя («бегунок»);  
 6 – боковой контакт крышки; 7 – центральный контакт крышки;  
 8 – контактный уголек; 9 – резистор; 10 – наружный контакт пластины  
 ротора; 11 – крышка распределителя; 12 – пластина центробежного  
 регулятора; 13 – кулачок прерывателя; 14 – грузик; 15 – контактная группа;  
 16 – подвижная пластина прерывателя; 17 – винт крепления контактной  
 группы; 18 – паз для регулировки зазоров в контактах; 19 – конденсатор;  
 20 – корпус прерывателя-распределителя; 21 – приводной валик;  
 22 – фильц для смазки кулачка*

**Системы со статическим распределением энергии.** В процессе разработки новых систем зажигания одной из главных задач было отказаться от всех наиболее ненадежных компонентов системы – не только от контактного прерывателя, но и от механического распределителя зажигания. От контактного прерывателя удалось отказаться

путем внедрения микропроцессорных систем управления (см. выше). От распределителя удалось отказаться разработкой так называемых *систем зажигания со статическим распределением энергии или статических систем зажигания* (статическим – потому что в этих системах отсутствуют движущиеся части, имеющиеся в распределителе). Так как распределитель в этих системах отсутствует, они также имеют обозначения DLI (DistributorLess Ignition), DIS (DistributorLess Ignition System) («система без распределителя»), DI (Direct Ignition), DIS («система прямого зажигания», «непосредственное зажигание»).

С внедрением этих систем пришлось вносить существенные изменения и в конструкцию катушки зажигания (использовать двух- и четырехвыводные катушки) и/или использовать системы с несколькими катушками зажигания. Все системы зажигания без распределителя делятся на *два блока* – *системы независимого зажигания* с индивидуальными катушками зажигания на каждый цилиндр двигателя (EFS и COP системы) и *системы синхронного зажигания*, где одна катушка обслуживает, как правило, два цилиндра (DFS-системы) (рис. 4.11).

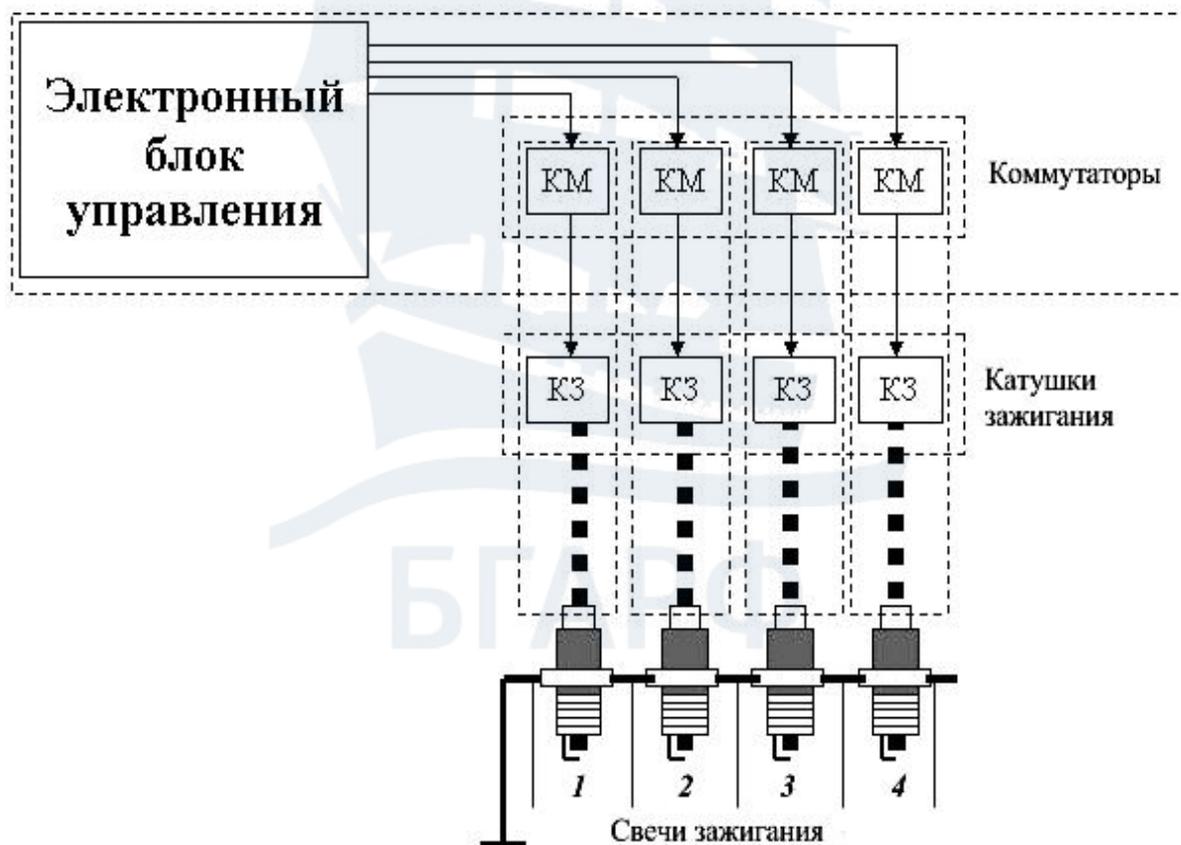


Рис. 4.11. Принципиальная схема системы зажигания с управлением от электронного блока и катушкой зажигания на свече

**Систему EFS (нем. Einzel Funken Spule) называют системой независимого зажигания**, так как в ней (в отличие от систем синхронного зажигания) каждая катушка и управляется независимо, и дает искру только для одного цилиндра. В этой системе каждая свеча имеет свою индивидуальную катушку зажигания. Кроме отсутствия в системе механических движущихся частей, дополнительным преимуществом является то, что при выходе из строя катушки перестанет работать только один «ее» цилиндр, а система в целом сохранит работоспособность.

Коммутатор в таких системах может представлять собой один блок для всех катушек зажигания, отдельные блоки (несколько коммутаторов) для каждой катушки зажигания и быть как интегрирован с электронным блоком управления, так и устанавливаться отдельно. Катушки зажигания также могут стоять как отдельно, так и единым блоком (но в любом случае они стоят отдельно от ЭБУ) и объединены с коммутаторами.

Одной из наиболее популярных разновидностей EFS-систем является так называемая **COP система (Coil on Plug – «катушка на свече»)** – в этой системе катушка зажигания ставится прямо на свечу (рис. 4.12).

Таким образом, стало возможным полностью избавиться еще от одного не вполне надежного компонента системы зажигания – от высоковольтных проводов.

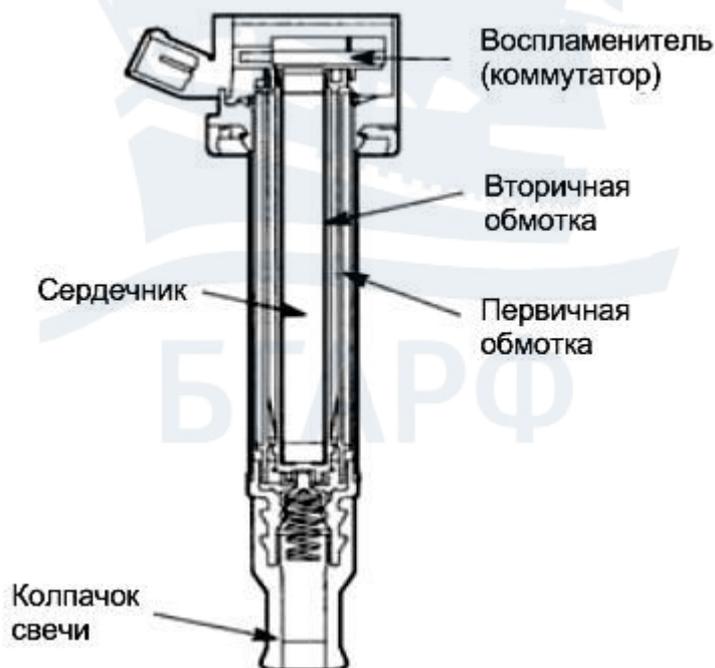


Рис. 4.12. Устройство катушки зажигания в системе COP (с интегрированным воспламенителем)

#### 4.5. Система статического синхронного зажигания с двухвыводными катушками зажигания

Кроме систем с индивидуальными катушками используются и системы, где одна катушка обеспечивает высоковольтный разряд на двух свечах одновременно (рис. 4.13). При этом получается, что в одном из цилиндров, который находится в такте сжатия, катушка дает «рабочую искру», а в сопряженном с ним, который находится в такте выпуска, дает «холостую искру» (*одна катушка на две свечи*) – *DFS* (нем. *Doppel Funken Spule*) система.

Такая система часто называется системой зажигания с холостой искрой – "wasted spark". Например, в 6-цилиндровом V-образном двигателе на цилиндрах 1 и 4 поршни занимают одно и то же положение (оба находятся в верхней и нижней мертвых точках одновременно) и движутся в унисон, но находятся на разных тактах. Когда цилиндр 1 находится на такте сжатия, то цилиндр 4 – на такте выпуска, и наоборот.

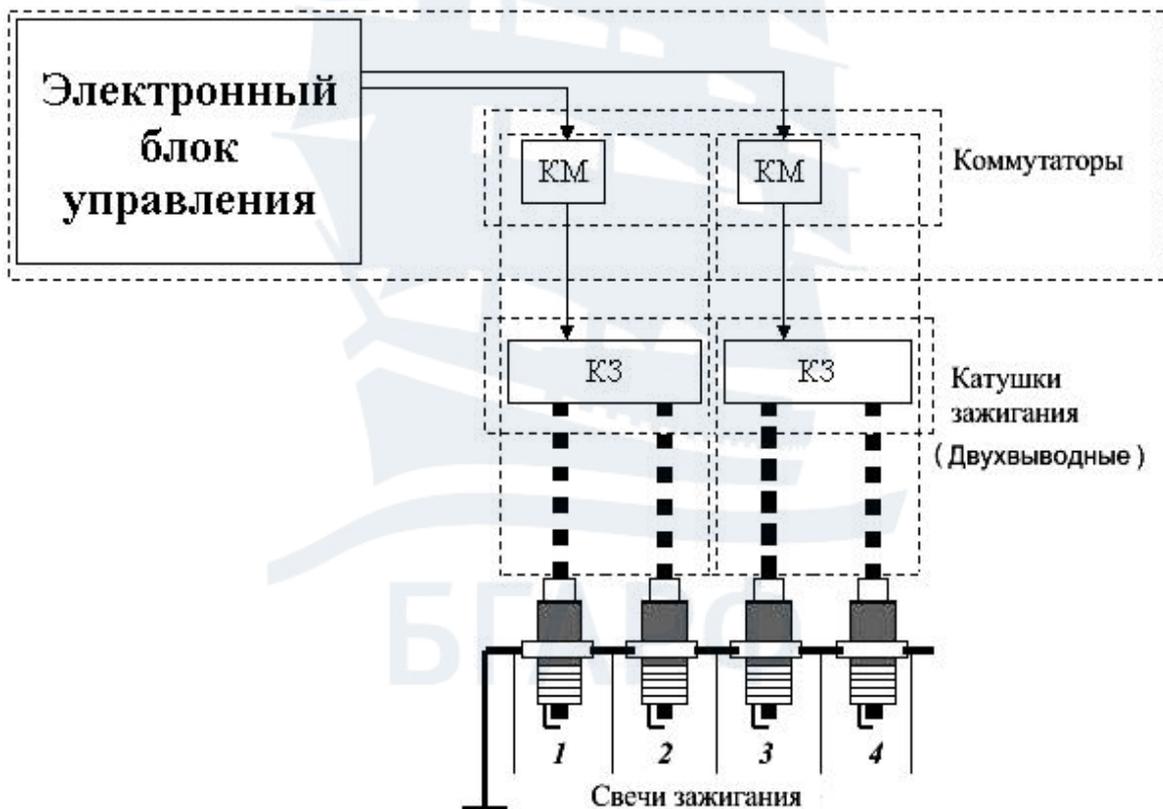
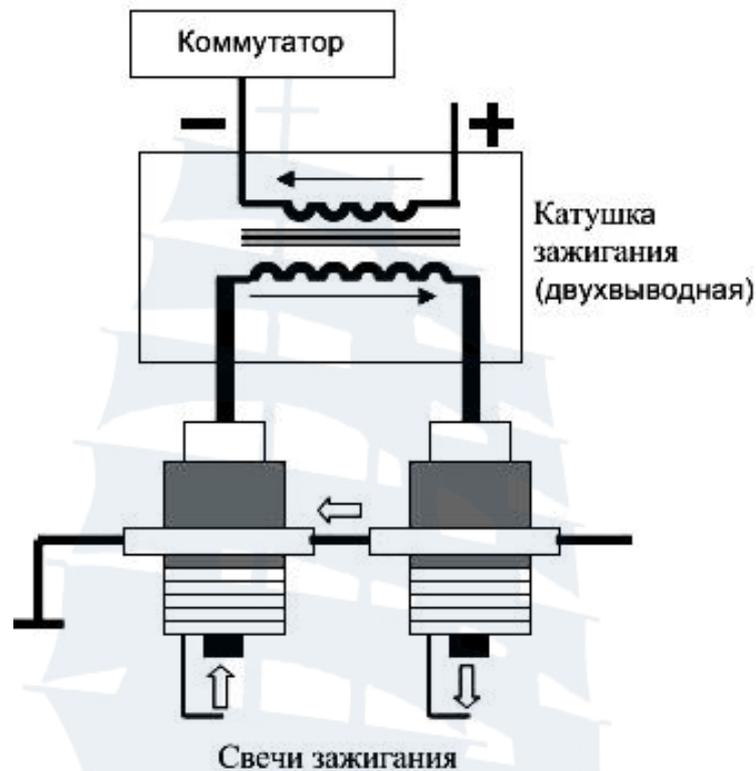


Рис. 4.13. Принципиальная схема системы зажигания синхронного зажигания с двухвыводными катушками зажигания

Высокое напряжение, вырабатываемое во вторичной обмотке, подается напрямую на каждую свечу зажигания. В одной из свечей зажигания искра проходит от центрального электрода к боковому, а в другой свече искра проходит от бокового к центральному электроду (рис. 4.14).



*Рис. 4.14. Принципиальная схема работы зажигания с двухвыводными катушками зажигания*

Напряжение, необходимое для образования искры, определяется искровым промежутком и давлением сжатия. Если искровой промежуток между свечами обоих цилиндров равен, для разряда необходимо напряжение, пропорциональное давлению в цилиндре. Вырабатываемое высокое напряжение разделяется в соответствии с давлением цилиндров. Цилиндр на такте сжатия требует и использует больший разряд напряжения, чем на такте выпуска. Это происходит потому, что цилиндр на такте выпуска находится под атмосферным давлением, поэтому расход энергии гораздо ниже.

По сравнению с системой зажигания с распределителем, общий расход энергии в системе без распределителя такой же. В системе зажигания без распределителя потеря энергии от искрового промежутка между ротором распределителя и клеммой колпачка заменяется потерей энергии на холостую искру в цилиндре на такте выпуска.

Катушки зажигания в системе DFS могут устанавливаться как отдельно от свечей и связываться с ними высоковольтными проводами (как в системе EFS), так и прямо на свечах (как в системе COP, но в этом случае высоковольтные провода все равно используются для передачи разряда на свечи смежных цилиндров – назовем "DFS-COP").

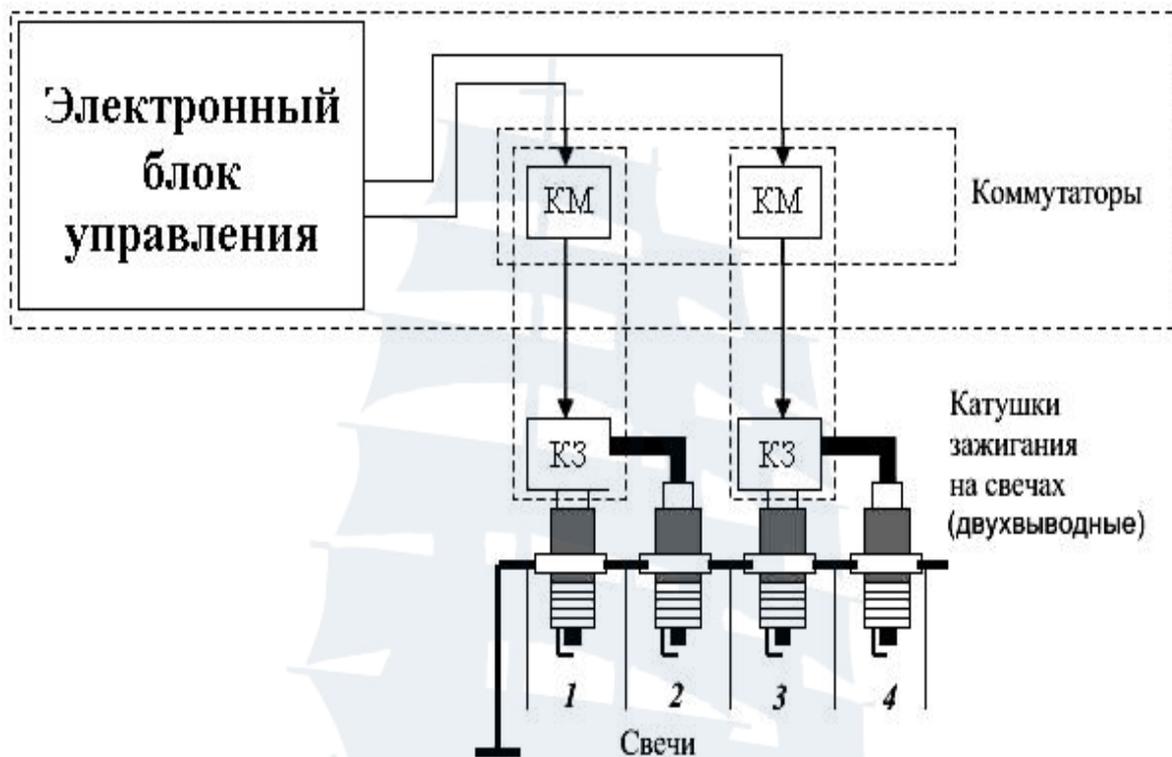


Рис. 4.15. Принципиальная схема системы "DFS-COP"

Также в этой системе (рис. 4.15) коммутаторы могут быть объединены с соответствующими катушками – вот как выглядит такой вариант на примере Mitsubishi Outlander (рис. 4.16).

**Высоковольтные провода** – соединяют накопитель энергии с распределителем или свечами и распределитель со свечами. В системах зажигания COP отсутствуют.

**Свечи зажигания (spark plug)** – необходимы для образования искрового разряда и зажигания рабочей смеси в камере сгорания двигателя. Свечи устанавливаются в головке цилиндра. Когда импульс тока высокого напряжения попадает на свечу зажигания, между ее электродами проскакивает искра – именно она воспламеняет рабочую смесь.

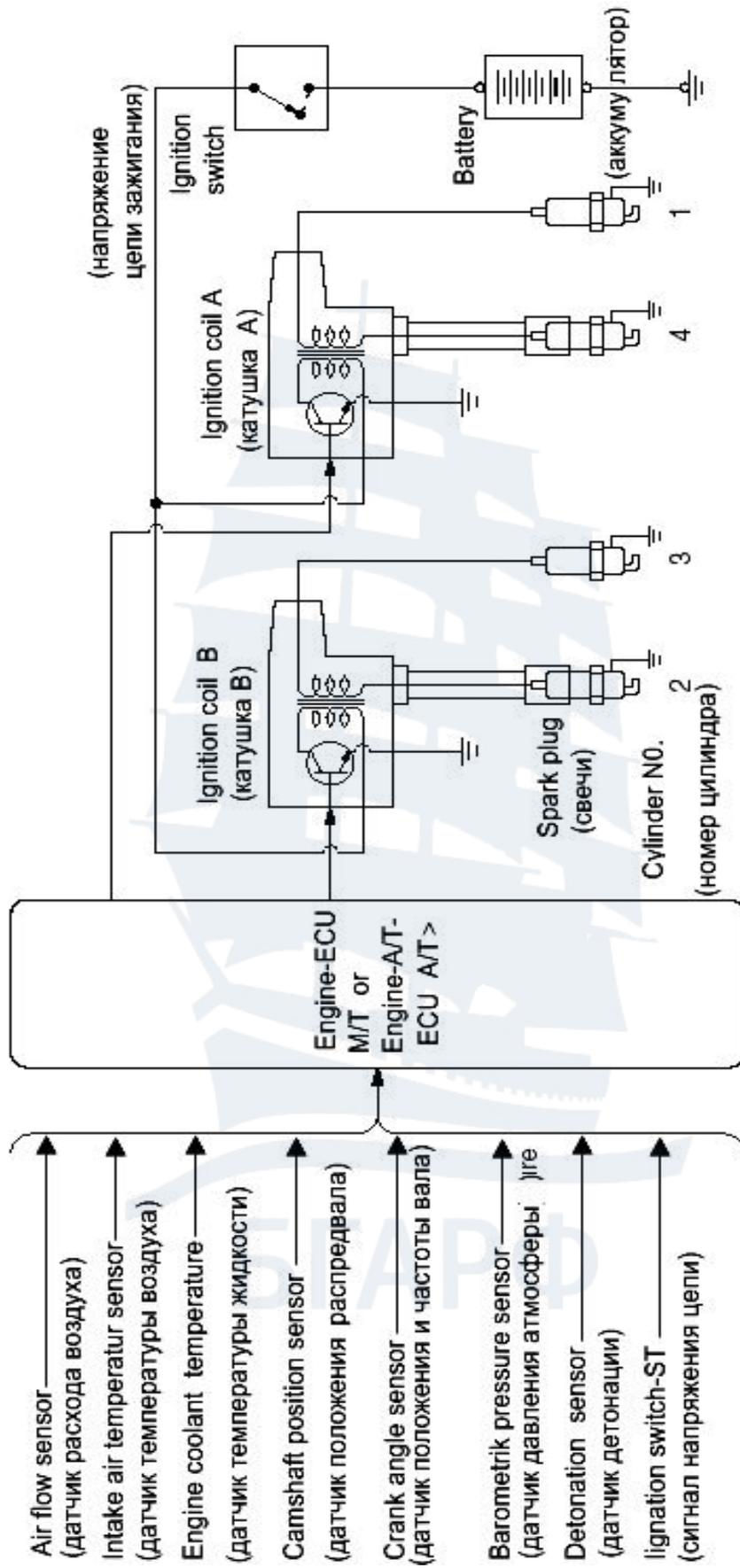
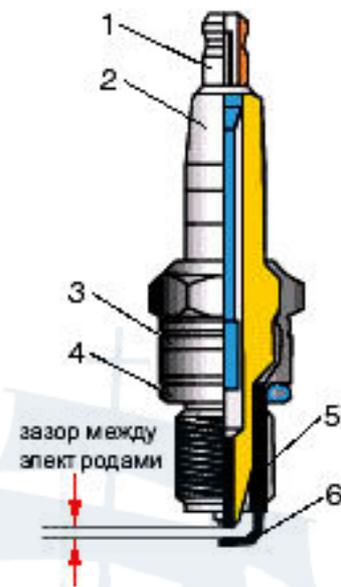


Рис. 4.16. Схема системы зажигания Mitsubishi Outlander



*Рис. 4.17. Свеча зажигания:*

*1 – контактная гайка; 2 – изолятор; 3 – корпус; 4 – уплотнительное кольцо; 5 – центральный электрод; 6 – боковой электрод*

Как правило, на цилиндр устанавливается по одной свече. Однако, бывают и более сложные системы с двумя свечами на цилиндр, причем не всегда свечи срабатывают одновременно (например, на новейшем Honda Civic Hybrid используется система DSI – Dual Sequential Ignition – при малых оборотах две свечи одного цилиндра срабатывают последовательно: сначала та из них, что ближе к впускному клапану, а затем вторая – чтобы топливовоздушная смесь сгорала быстрее и полнее).

***Любая система зажигания четко делится на две части:***

– ***низковольтную (первичную, англ. primary) цепь*** – включает первичную обмотку катушки зажигания и непосредственно связанные с ней цепи (прерывателя, коммутатора и других компонентов в зависимости от устройства конкретной системы);

– ***высоковольтную (вторичную, англ. secondary) цепь*** – включает вторичную обмотку катушки зажигания, систему распределения высоковольтной энергии, высоковольтные провода, свечи.

Учитывая все возможные модификации и комбинации приведенных выше элементов, на автомобилях используются не менее 15-20 разновидностей систем зажигания. Все они подробно рассмотрены в специализированной литературе и информационных базах по конкретным маркам и моделям автомобилей.

## Системы зажигания с катушкой на свече (КНС)

Сначала из системы зажигания автомобиля исчез распределитель. Теперь проектировщики автомобильных двигателей решили избавиться и от высоковольтных проводов. Что дальше, выкинем свечи? Непременно, но не сейчас. Ничего не получится, пока окончательно не доработана система впрыска, объединяющая форсунку и свечу зажигания в одном модуле. Правда произойти это может совсем скоро, а пока придется осваивать методы диагностики и ремонта самой современной на сегодняшний день системы зажигания с катушкой на свече (КНС), английское название которой «Coil-on-Plug», сокращенно COP.

От высоковольтных проводов стали избавляться по той же самой причине, что и от распределителя зажигания. Автопроизводители неуклонно стремятся к снижению себестоимости и повышению надежности своей продукции. Во-первых, для их установки на сборочном конвейере требуется применение ручного труда, что весьма накладно. Кроме того, высоковольтные провода зажигания подвержены быстрому износу и старению, что снижает эффективность и надежность электронной системы зажигания в целом.

Пока работает двигатель, по ним постоянно проходят электрические импульсы с напряжением от 5 до 40 тыс. вольт. Для обеспечения надежной искры высоковольтные провода должны обладать надежной изоляцией, а также способностью подавлять возникающие электромагнитные помехи. Их внешняя поверхность должна противостоять губительному воздействию высоких температур и химически активных веществ, входящих в состав моторных масел, антифризов и прочих применяемых в автомобилях жидкостей.

Насколько бы совершенной ни была технология производства высоковольтных проводов зажигания, они были и остаются слабым звеном современных двигателей. Даже самая надежная изоляция не устоит при попадании провода на раскаленную поверхность выпускного коллектора. Провода рвутся и повреждаются при замене свечей, когда автовладельцы или механики так и пытаются стянуть их со свечи, дергая за сам провод, а не его наконечник. В довершение картины, высоковольтные провода излучают большое число электромагнитных помех, которые могут нарушить работу датчиков и электронных блоков автомобиля.

Решение всех этих проблем было найдено, когда автоинженеры предложили подсоединить катушку к свече зажигания напрямую, минуя провода. Это позволило создать более надежную и, одновременно, более дешевую систему. Вот почему система КНС нашла свое применение в абсолютном большинстве современных автомобилей.

Применение КНС не только снизило себестоимость автомобиля, но и повлияло на его надежность. Отсутствие высоковольтных проводов означает отсутствие утечек тока и снижение количества перебоев зажигания. Применение индивидуальной катушки на каждом из цилиндров позволило увеличить время накопления заряда и положительно сказалось на устойчивости работы двигателя на высоких оборотах, когда традиционная система зажигания уже не способна обеспечить двигатель столь же мощными высоковольтными импульсами с требуемой частотой, вызывая тем самым перебои и снижение мощности.

По данным концерна Даймлер-Крайслер, применение КНС позволило увеличить мощность искрового разряда на 28 % по сравнению с системой зажигания предыдущего поколения. Это улучшает процесс сгорания топлива и обеспечивает ровную работу двигателя при использовании обедненной смеси (для воспламенения обедненной смеси требуется большая мощность искры).

Система КНС еще сравнительно молода и серийно используется только в автомобилях с 1995 года выпуска. В большинстве случаев она устанавливается сверху головки блока цилиндров для удобства доступа при обслуживании. Такое расположение также оптимально для предотвращения перегрева катушек от выпускного коллектора.

Некоторые модели двигателей не могут быть оснащены системой КНС из-за особенностей расположения свечей зажигания, отсутствия места для катушек либо их близости к коллектору. В этих случаях производители решают эту проблему, расположив катушки на клапанной крышке двигателя и соединив их со свечами короткими проводами.

#### **4.6. Устройство системы КНС (катушка на свече)**

В системе зажигания КНС датчик положения коленвала (ДПК) двигателя считывает сигналы положения коленчатого вала и передает их в электронный блок управления (ЭБУ) двигателем и трансмиссией

для вычисления момента образования искрового разряда. Для определения номера цилиндра, в который должна быть подана искра, используется сигнал датчика положения распределителя (ДПР), который также передается в ЭБУ. На экране осциллографа эти сигналы имеют прямоугольную форму с максимальным значением напряжения 5V и минимальным 0,3V.

Таким образом для определения момента зажигания и последовательности включения катушек коленчатому валу двигателя требуется сделать не менее одного полного оборота.

Для отключения питания катушек на остановленном двигателе, оборудованном КНС применяется автоматическое реле остановки (АРО), подающее напряжение в систему зажигания только до тех пор, пока ЭБУ получает сигналы ДПК и ДПР, подтверждающие вращение двигателя. При прекращении подачи этих сигналов (двигатель остановился) ЭБУ отключает реле питания топливного насоса и подает команду АРО отключить систему зажигания. АРО также обеспечивает электропитанием систему впрыска и при остановке двигателя автоматически отключает и ее.

Реле питания топливного насоса и АРО располагаются в блоке-распределителя электропитания.

Функционирование системы КНС по существу аналогично работе других систем зажигания. Каждая исправная катушка имеет низкое сопротивление первичной обмотки (порядка 0,4-0,6 Ом) и обеспечивает искровой разряд напряжением около 40 тыс. вольт на вторичной обмотке. Некоторые производители устанавливают на вторичную обмотку дополнительное сопротивление для снижения электромагнитных помех.

Единственным отличием КНС от систем предыдущих поколений является расположение катушки непосредственно на свече зажигания, что снижает потери, возникающие при передаче высоковольтного заряда по проводам и обеспечивает более мощный искровой разряд.

Список симптомов возможных неисправностей КНС в большинстве случаев аналогичен симптомам других систем зажигания и включает в себя перебои зажигания, плохой запуск или отказ запуска.

Свечи зажигания по-прежнему могут давать сбои из-за загрязнений, вызванных попаданием масла в цилиндр или применением некачественного топлива. Также возможны сбои системы опережения зажигания и детонация. Так что применение КНС не панацея.

### ***Свечи зажигания***

В системе КНС рекомендуется установка современных свечей с применением платины в качестве элемента, входящего в состав центрального электрода. Они несколько дороже обычных, но обладают намного большим ресурсом и при правильной эксплуатации срок их службы может достигать до 160 тыс. км. пробега. Однако они также подвержены загрязнению и выходу из строя при работе с переобогащенной топливной смесью, забрызгивании маслом либо попадании охлаждающей жидкости в цилиндр через поврежденную прокладку головки блока.

#### ***Общепринятые английские обозначения:***

Система зажигания с катушкой на свече – Coil-on-Plug (COP).

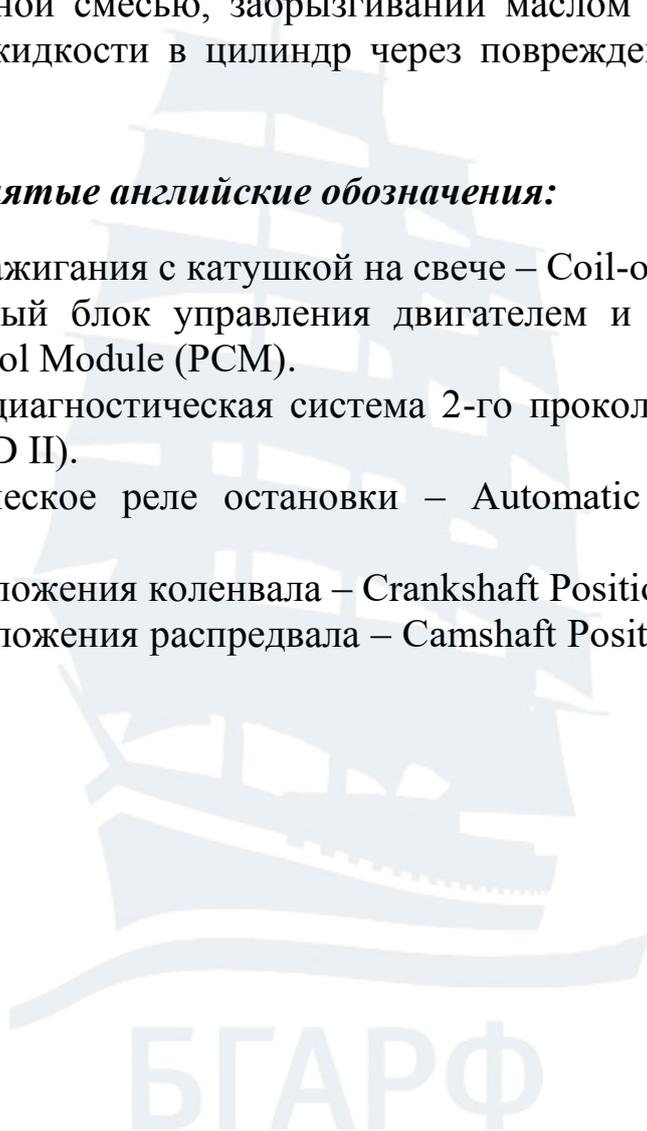
Электронный блок управления двигателем и трансмиссией – Powertrain Control Module (PCM).

Бортовая диагностическая система 2-го поколения – On-board Diagnostics (OBD II).

Автоматическое реле остановки – Automatic Shutdown relay (ASD relay).

Датчик положения коленвала – Crankshaft Position Sensor (CPS).

Датчик положения распредвала – Camshaft Position Sensor (CAM sensor).



## 5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Анализ зарубежных источников информации показал, что перспективными направлениями развития силовых установок автомобилей являются:

- гибридная силовая установка: поршневой двигатель – генератор – электродвигатель;
- гибридная силовая установка: поршневой двигатель – аккумулятор – электродвигатель;
- электросиловая установка: аккумулятор – электродвигатель;
- водородная силовая установка: поршневой двигатель, работающий по бензиновому или дизельному циклу на водороде;
- силовая установка на топливно-водородных элементах (ТВЭЛ): водородно-кислородный аккумулятор – электродвигатель.

### 5.1. Силовая установка на топливно-водородных элементах

Наиболее интересным и менее изученным является двигатель на топливно-водородных элементах, тогда как двигатель, работающий на водороде, является лишь промежуточным звеном в цепи перехода от классических двигателей к водородным.

Топливные элементы осуществляют прямое превращение энергии топлива в электричество минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения. Это электрохимическое устройство в результате высокоэффективного «холодного» горения топлива непосредственно вырабатывает электроэнергию.

При обычном горении углеводородного топлива в кислороде протекает окисление органического топлива, и химическая энергия топлива неэффективно переходит в тепловую энергию. Но оказалось возможным реакцию окисления, например водорода с кислородом, провести в среде электролита и при наличии электродов получить электрический ток.

Отметим, что в топливных элементах в качестве источника водорода кроме воды могут также применяться уголь, окись углерода, спирты, гидразин, другие органические вещества, а в качестве окислителей – воздух, перекись водорода, хлор, бром, азотная кислота и т. д.

Так как в топливных элементах конечным продуктом сгорания водорода является вода, то они считаются наиболее чистыми с точки зрения влияния на окружающую среду. Основная проблема заключа-

ется только в нахождении эффективного и недорогого способа получения водорода.

В топливном элементе в отличие от аккумуляторов – и горючее, и окислитель подаются в него извне. Топливный элемент является только посредником в реакции и в идеальных условиях мог бы работать практически вечно, и представляет собой электрохимический генератор, обеспечивающий прямое преобразование химической энергии в электрическую.

Хотя то же самое происходит в электрических аккумуляторах, топливные элементы имеют два отличия:

1) они функционируют до тех пор, пока топливо и окислитель поступают из внешнего источника;

2) химический состав электролита в процессе работы не изменяется, т. е. топливный элемент не нуждается в перезарядке.

**Принцип действия.** Топливный элемент (рис. 5.1) состоит из двух электродов, разделенных электролитом, и систем подвода топлива на один электрод и окислителя на другой, а также системы удаления продуктов реакции. Для ускорения химической реакции используются катализаторы. Внешней электрической цепью топливный элемент соединен с нагрузкой, которая потребляет электроэнергию.

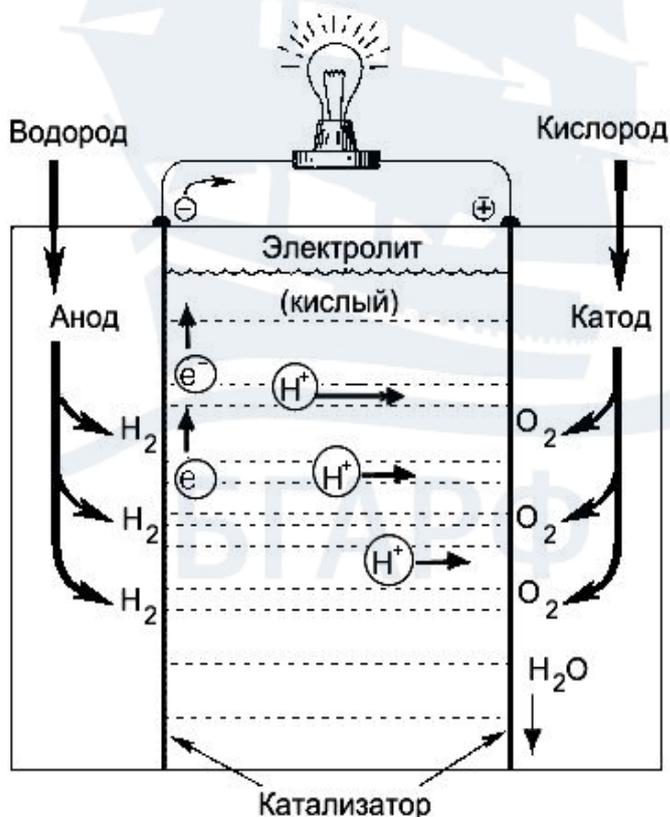
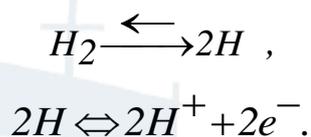


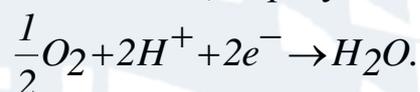
Рис. 5.1. Водородно-кислородный топливный элемент

В изображенном на рис. 5.1 топливном элементе с кислым электролитом водород подается через полый анод и поступает в электролит через очень мелкие поры в материале электрода.

При этом происходит разложение молекул водорода на атомы, которые в результате хемосорбции, отдавая каждый по одному электрону, превращаются в положительно заряженные ионы. Этот процесс может быть описан следующими уравнениями:



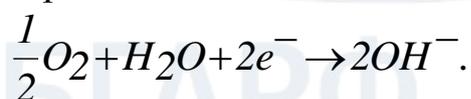
Ионы водорода диффундируют через электролит к положительной стороне элемента. Подаваемый на катод кислород переходит в электролит и также реагирует на поверхности электрода с участием катализатора. При соединении его с ионами водорода и электронами, которые поступают из внешней цепи, образуется вода:



В топливных элементах со щелочным электролитом (обычно это концентрированные гидроксиды натрия или калия) протекают сходные химические реакции. Водород проходит через анод и реагирует в присутствии катализатора с имеющимися в электролите ионами гидроксидов ( $OH^-$ ) с образованием воды и электрона:



На катоде кислород вступает в реакцию с водой, содержащейся в электролите, и электронами из внешней цепи. В последовательных стадиях реакций образуются ионы гидроксидов (а также пергидроксидов  $O_2H^-$ ). Результирующую реакцию на катоде можно записать в виде:



Поток электронов и ионов поддерживает баланс заряда и вещества в электролите. Образующаяся в результате реакции вода частично разбавляет электролит. В любом топливном элементе часть энергии химической реакции превращается в тепло. Поток электронов во внешней цепи представляет собой постоянный ток, который используется для совершения работы. Большинство реакций в топливных элементах обеспечивают ЭДС около 1 В. Размыкание цепи останавливает работу топливного элемента.

Теоретически размеры топливного элемента могут быть сколь угодно большими. Однако на практике несколько элементов объединяются в небольшие модули или батареи, которые соединяются либо последовательно, либо параллельно.

*Типы топливных элементов.* Существуют различные типы топливных элементов. Их можно классифицировать, например, по используемому топливу, рабочему давлению и температуре, по характеру применения.

*Элементы на водородном топливе.* В этом типичном описанном выше элементе водород и кислород переходят в электролит через микропористые углеродные или металлические электроды. Высокая плотность тока достигается в элементах, работающих при повышенной температуре (около 250 °С) и высоком давлении. Элементы, использующие водородное топливо, получаемое при переработке углеводородного топлива, например природного газа или нефтепродуктов, по-видимому, найдут наиболее широкое коммерческое применение. Объединяя большое число элементов, можно создавать мощные энергетические установки.

Новым типом элементов, способных работать на водороде и кислороде при нормальных температуре и давлении, являются элементы *с ионообменными мембранами*. В этих элементах вместо жидкого электролита между электродами располагается полимерная мембрана, через которую свободно проходят ионы. В таких элементах наряду с кислородом может использоваться воздух. Образующаяся при работе элемента вода не растворяет твердый электролит и может быть легко удалена.

*Элементы на углеводородном и угольном топливах.* Топливные элементы, которые могут превращать химическую энергию таких доступных и сравнительно недорогих топлив, как пропан, природный газ, метиловый спирт или бензин непосредственно в электричество, являются предметом интенсивного исследования. Однако пока не достигнуты успехи в создании топливных элементов, работающих на газах, при нормальной температуре.

Имеются и другие типы топливных элементов, в основном, отличающиеся типом применяемого электролита. Практически все они требуют в качестве топлива водород, поэтому возникает логичный вопрос: где его взять? Конечно, можно было бы употреблять сжатый водород из баллонов, но тут сразу же появляются проблемы связанные с транспортировкой и хранением этого весьма огнеопасного газа под большим давлением. Разумеется, можно использовать водород

в связанном виде как в металлгидридных аккумуляторах. Но все же остается задача его добычи и транспортировки, ведь инфраструктуры водородных заправок не существует.

Впрочем, тут тоже есть решение – в качестве источника водорода можно применять жидкое углеводородное топливо. Например, этиловый или метиловый спирт. Правда, тут уже требуется специальное дополнительное устройство – топливный преобразователь, при высокой температуре (около 240 °С) преобразующий спирты в смесь газообразных  $H_2$  и  $CO_2$ .

Такое устройство – метаноловый топливный элемент, разработкой которого занимаются все крупнейшие производители автомобилей.

Принципиальная разница между водородным и метанольным топливными элементами заключается в применяемом катализаторе. Катализатор в метанольном топливном элементе позволяет отрывать протоны непосредственно от молекулы спирта. Таким образом, решается вопрос с топливом – метиловый спирт производится для промышленности, его легко хранить и транспортировать, а для зарядки метанолового топливного элемента достаточно заменить картридж с топливом.

Но метанол токсичен. К тому же эффективность метанольного элемента значительно ниже, чем у водородного. В качестве топлива можно использовать этиловый спирт, производство которого налажено в мире. Однако эффективность этаноловых элементов еще ниже, чем у метаноловых.

*Вывод.* Самым перспективным направлением является водородно-кислородный топливный элемент. Однако из-за нерешенных пока вопросов производства, хранения и транспортировки водорода промежуточными решениями могут быть топливные элементы на углеводородных топливах: нефтяные, газовые, спиртовые, гидразоновые. Еще одним промежуточным решением может стать поршневой двигатель, работающий по бензиновому или дизельному циклу на водороде.

## 5.2. Гибридные двигатели

В открытой печати появились материалы, подготовленные компанией Lexus, в которых приводится ограниченная информация о том, как устроена и работает силовая установка кроссовера Lexus RX450h, одного из самых популярных гибридов в России. Она представляет собой комбинацию эластичного V-образного шестицилиндрового двигателя объемом 3,3 литра, трансмиссии и двух электродвигателей.

Экономичность модели достигается не только за счет электропривода и системы рекуперации энергии торможения. Основным двигателем RX450h играет в этом не менее важную роль.

Попробуем дополнить имеющуюся информацию анализом особенностей этого бензинового мотора. Обычно его называют малоизвестным словосочетанием «двигатель, работающий в цикле Аткинсона».

**Цикл Аткинсона** – модифицированный цикл Отто четырехтактного двигателя внутреннего сгорания. Предложен английским инженером Джеймсом Аткинсоном.

В двигателе Аткинсона рабочий ход (3-й такт цикла Отто) был увеличен за счёт усложнения кривошипно-шатунного механизма. В XIX веке двигатель распространения не получил из-за сложной механики. В XXI веке двигатель Аткинсона с компьютерным регулированием времён тактов применяется, например, в автомобилях «Toyota Prius», «Lexus HS 250h» и «Ford Fusion (США)», хотя примененный там принцип больше напоминает цикл Миллера.

Цикл Аткинсона позволяет получить лучшие экологические показатели и экономичность, но требует высокой частоты вращения. На малых оборотах выдаёт сравнительно малый момент и может заглохнуть.

На гибридном Toyota Prius выгодно применение двигателя Аткинсона, так как на малых оборотах он не нагружается. Фактически на данном автомобиле применен не двигатель Аткинсона, а его упрощенный аналог, построенный по принципу цикла Миллера. Автомобиль разгоняется электромотором, который выдаёт полный момент в широком диапазоне оборотов.

**Двигатель Миллера** – это не что иное, как усовершенствованный классический двигатель внутреннего сгорания. Конструктивно эти моторы практически одинаковы. Разница заключается в фазах газораспределения. Отличие их в том, что классический мотор работает по циклу немецкого инженера Николоса Отто, а двигатель Миллера – по усовершенствованному и упрощенному циклу британского инженера Джеймса Аткинсона.

Двигатель, работающий по циклу Миллера по своей эффективности уступает циклу Аткинсона, но имеет простую конструкцию, практически ничем не отличающуюся от классического двигателя Отто.

Чтобы разобраться, в чем секрет двигателя Миллера, следует вспомнить принцип работы всем знакомого четырехтактного мотора Отто (рис. 5.2, а).

*Первый такт – такт впуска.* Начинается он после открытия впускного клапана при нахождении поршня вблизи верхней мертвой точки (ВМТ). Двигаясь вниз, поршень создает в цилиндре разрежение, которое способствует всасыванию в них воздуха и топлива. При этом в режимах малых и средних оборотов двигателя, когда дроссельная заслонка открыта частично, появляются так называемые насосные потери. Их суть – из-за большого разрежения во впускном коллекторе поршням приходится работать в режиме насоса, на что затрачивается часть мощности двигателя.

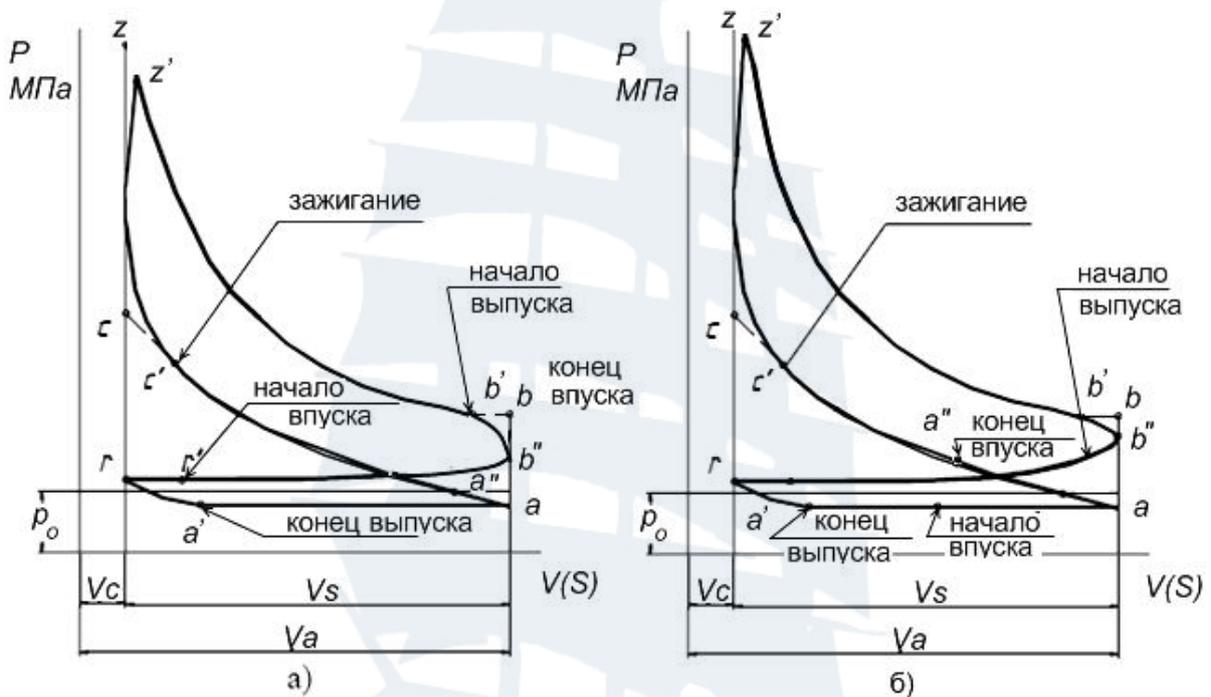


Рис. 5.2. Индикаторная диаграмма:  
а – двигателя Отто; б – двигателя Миллера

Кроме того, при этом ухудшается наполнение цилиндров свежим зарядом и соответственно повышается расход топлива и выбросы вредных веществ в атмосферу. Когда поршень достигает нижней мертвой точки (НМТ), впускной клапан закрывается. После этого поршень, двигаясь вверх, сжимает горючую смесь – протекает такт сжатия.

Вблизи ВМТ смесь воспламеняют, давление в камере сгорания повышается, поршень движется вниз – рабочий ход. В НМТ открывается выпускной клапан. При движении поршня вверх-такт выпуска – оставшиеся в цилиндрах отработавшие газы выталкиваются в систему выпуска.

Стоит отметить, что в момент открытия выпускного клапана газы в цилиндрах еще находятся под давлением, поэтому освобождение этой неиспользованной энергии называют потерями выпуска. Функцию снижения шумности при этом возложили на глушитель выхлопной системы.

Чтобы уменьшить негативные явления, возникающие при работе двигателя с классической схемой фаз газораспределения, в двигателе автомобиля «Мазда» Миллера (рис. 5.2, б) фазы газораспределения изменили в соответствии с циклом Аткинсона. Впускной клапан закрывается не вблизи нижней мертвой точки, а значительно позже – при повороте коленвала на  $70^{\circ}$  от НМТ (в двигателе Ральфа Миллера клапан закрывается наоборот – намного раньше прохождения поршнем НМТ). Цикл Аткинсона дает целый ряд преимуществ.

*Во-первых*, снижаются насосные потери, так как часть смеси при движении поршня вверх выталкивается во впускной коллектор, уменьшая в нем разрежение.

*Во-вторых*, изменяется степень сжатия. Теоретически она остается прежней, так как ход поршня и объем камеры сгорания не изменяются, а вот фактически, за счет запоздалого закрытия впускного клапана, уменьшается с 10 до 8. А это уже снижение вероятности появления детонационного сгорания топлива, а значит, отсутствие необходимости повышать обороты двигателя переключением на пониженную передачу при увеличении нагрузки. Снижает вероятность детонационного сгорания и то, что горячая смесь, выталкиваемая из цилиндров при движении поршня вверх до момента закрытия клапана, выносит с собой во впускной коллектор часть тепла, отобранного от стенок камеры сгорания.

*В-третьих*, изменяется соотношение между степенями сжатия и расширения, так как за счет более позднего закрытия впускного клапана длительность такта сжатия по отношению к длительности такта расширения, когда открыт выпускной клапан, значительно уменьшилась. Двигатель работает по так называемому циклу с увеличенной степенью расширения, при котором энергия отработавших газов используется более длительный период, т. е. с уменьшением потерь выпуска. Это дает возможность более полно использовать энергию отработавших газов, что, собственно, и обеспечило высокую экономичность двигателя.

Привлекательность V-образного шестицилиндрового двигателя, установленного на модель Xedos 9 (Millenia или Eunox 800), в том, что при рабочем объеме 2,3 л он выдает мощность 213 л.с. и крутящий

момент 290 Нм, что равноценно характеристикам 3-литровых моторов. В то же время расход топлива у такого мотора очень низкий – на трассе 6,3 л/100 км, в городе – 11,8 л/100 км, что соответствует показателям 1,8-2-литровых двигателей.

### 5.3. КПД циклов Отто и Миллера и их термодинамический анализ

В рамках технической термодинамики работа бензиновых поршневых двигателей внутреннего сгорания в зависимости от особенностей описывается термодинамическими циклами Отто, Аткинсона или Миллера.

Бензиновый двигатель работает по циклу Миллера со сжатием 13:1 на обычном бензине АИ-95.

Время закрытия впускного клапана, обороты и нагрузку на двигатель контролирует бортовой компьютер.

Термодинамический КПД определяется:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

где  $\varepsilon$  – степень сжатия;  $k$  – показатель адиабаты.

От термодинамического КПД можно перейти к эффективному КПД, для чего необходимо в формуле заменить показатель адиабаты  $k$  на средний для бензиновых двигателей показатель политропы расширения  $n_2$ , и умножив значение термодинамического КПД на средний механический КПД. Такой подход не в полной мере обеспечивает точность расчетов, но для сравнительной оценки вполне допустим.

Эффективные показатели цикла Мюллера выше аналогичных показателей цикла Отто на 19 %.

Преимущество цикла Мюллера в том, что достигается высокая степень сжатия. При одинаковых степенях сжатия эффективный КПД  $\eta_e$  цикла Миллера выше аналогичных показателей цикла Отто.

Такая же закономерность наблюдается и при одинаковых наивысших температурах цикла.

Эффективные показатели цикла Мюллера выше аналогичных показателей цикла Отто на 19 %. Преимущество цикла Мюллера в том, что достигается высокая степень сжатия. При одинаковых степенях сжатия эффективный КПД  $\eta_e$  цикла Миллера выше аналогичных

показателей цикла Отто. Такая же закономерность наблюдается и при одинаковых температурах цикла.

Для получения высокой мощности и крутящего момента, которые необходимы для элитной модели Mazda Xedos 9 (Millenia или Eunos 800), в двигателе Миллера применяется механический компрессор Лисхольма, установленный в развале блока цилиндров.

Кроме 2, 3-литрового мотора автомобиля Xedos 9, цикл Миллера начали применять в малонагруженном двигателе гибридной установки автомобиля Toyota Prius. Отличается он от маздовского тем, что в нем нет нагнетателя воздуха, а степень сжатия имеет высокое значение – 13,5

Эффективный КПД поршневого ДВС не превышает 40 %. Остальная тепловая энергия распределяется, в основном, между теплом выхлопных газов и нагревом конструкции двигателя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучать учебный материал целесообразно в определенной последовательности: название механизма, системы, узла; назначение; где и как установлен; тип, общее устройство; устройство деталей; работа; регулировки; возможные неисправности.

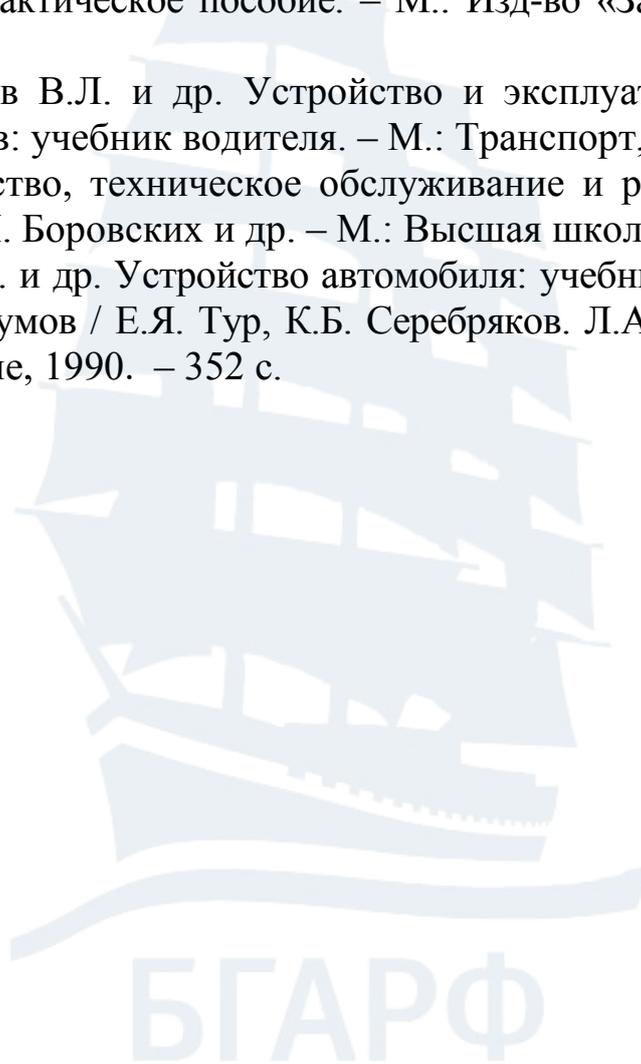
Этой же последовательности необходимо придерживаться при конспектировании, на самостоятельных занятиях и при ответах на вопросы.

Изучая назначение узла или агрегата, необходимо понять его роль в общей кинематической схеме, разобраться в предназначении, уяснить, какие функции он выполняет. При изучении устройства деталей следует четко уяснить значение данной детали в узле, ее взаимодействие с другими деталями.

Следует усвоить физическую сущность принципа работы узла, системы. Работу по каждой теме можно считать завершенной, если обучаемый способен четко и уверенно дать ответы на контрольные вопросы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков В.А., Козлов С.И. Топлива и топливоподача много-топливных и газодизельных двигателей. – М.: Изд-во МГТУ, 2000. – 296 с.
2. Щеглов, В.А. Методические указания к лабораторному практикуму на ПЭВМ. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010. – 76 с.
3. Росс Твег. Системы впрыска бензина. Устройство, обслуживание, ремонт: Практическое пособие. – М.: Изд-во «За рулем», 1999. – 144 с.
4. Роговцев В.Л. и др. Устройство и эксплуатация автотранспортных средств: учебник водителя. – М.: Транспорт, 1999. – 430 с.
5. Устройство, техническое обслуживание и ремонт автомобилей: учеб. / Ю.И. Боровских и др. – М.: Высшая школа, 1997. – 528 с.
6. Тур Е.Я. и др. Устройство автомобиля: учебник для автотранспортных техникумов / Е.Я. Тур, К.Б. Серебряков. Л.А. Жолобов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.





978980002002

**Валерий Александрович Щеглов**

## **СИЛОВЫЕ АГРЕГАТЫ**

Учебное пособие  
по дисциплинам «Силовые агрегаты»  
и «Рабочие процессы, конструкция  
и основы расчета энергетических установок  
и транспортно-технологического оборудования»  
направления подготовки 23.03.03  
«Эксплуатация транспортно-технологических  
машин и комплексов»  
для студентов всех форм обучения

---

*Редактор: М.Б. Априянц*

*Мл. редактор: Г.В. Деркач*

*Компьютерное редактирование:*

*О.В. Савина*

*Подписано в печать 12.03.2018.*

*Усл. печ. л. 6,4. Уч.-изд. л. 6,8.*

*Лицензия № 021350 от 28.06.99.*

*Печать офсетная.*

*Формат 60 x 90 1/16.*

*Тираж 67 экз. Заказ № 1413.*

*Доступ к архиву публикации и условия доступа к нему:  
<http://bgarf.ru/academy/biblioteka/elektronnyj-katalog/>*

*БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»*

*Издательство БГАРФ,*

*член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России  
236029 Калининград, ул. Молодежная, 6.*