Высшее профессиональное образование
БАКАЛАВРИАТ

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

УЧЕБНИК

Под редакцией доктора технических наук,
профессора М. Г. ШАТРОВА

*Допущено
Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по образованию
в области транспортных машин
и транспортно-технологических комплексов
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки бакалавров
«Эксплуатация транспортно-технологических
машин и комплексов»*

3-е издание, исправленное и дополненное

ACADEMA

Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 621.4(075.8)
ББК 39.33я73
А224

Рецензенты:
заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н. Э. Баумана, д-р техн. наук, проф. *Н. А. Иващенко*;
зав. кафедрой «Автомобили и тракторы» Воронежской государственной лесотехнической академии, д-р техн. наук, проф. *В. С. Волков*

А224 **Автомобильные** двигатели : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / [М. Г. Шатров, К. А. Морозов, И. В. Алексеев и др.] ; под ред. М. Г. Шатрова. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 464 с. — (Сер. Бакалавриат).
ISBN 978-5-4468-0186-2

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (квалификация «бакалавр»).

Даны классификация, состав и структура автомобильного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), а также основные показатели и особенности применяемых топлив. Рассмотрены рабочие процессы ДВС и их влияние на энергетические, экономические и экологические показатели. Описаны современные системы топливоподачи двигателей с искровым зажиганием (ДсИЗ) и дизелей, представлены характеристики автомобильных ДВС, экологические показатели и принципы управления ДВС. Приведены сведения по кинематике, динамике и уравновешиванию ДВС. Проанализированы принципы конструирования ДВС и особенности их механизмов. Описаны работа и особенности системы ДВС. Отражены перспективные направления развития автомобильных двигателей.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 621.4(075.8)
ББК 39.33я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Коллектив авторов, 2010
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-4468-0186-2

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АТС — аккумуляторная топливная система
ВСХ — внешняя скоростная характеристика
ВМТ — верхняя мертвая точка
ГД — газовый двигатель
ГТД — газотурбинный двигатель
ДВС — двигатель внутреннего сгорания
ДЗ — дроссельная заслонка
ДМЭ — диметиловый эфир
ДсИЗ — двигатель с искровым зажиганием
ДТ — дизельное топливо
КВ — коленчатый вал
КПД — коэффициент полезного действия
КС — камера сгорания
КШМ — кривошипно-шатунный механизм
КЭУ — комбинированная энергетическая установка
МГР — механизм газораспределительный
МПХ — многопараметровая характеристика
МЭРМ — метиловый эфир рапсового масла
НМТ — нижняя мертвая точка
НХ — нагрузочная характеристика
ОГ — отработавшие газы
ОНВ — охладитель наддувочного воздуха
ОЖ — охлаждающая жидкость
ПГ — природный газ
ПДВС — поршневой двигатель внутреннего сгорания
ПКВ — поворот коленчатого вала
ПН — приводной нагнетатель
ПХХ — принудительный холостой ход
РВ — распределительный вал
РПД — роторно-поршневой двигатель
РТ — рабочее тело
СХ — скоростная характеристика
СУ — система управления
ТА — топливная аппаратура
ТВС — топливовоздушная смесь
ТКР — турбокомпрессор
ТНВД — топливный насос высокого давления
ТПА — топливоподающая аппаратура
ТС — топливная система
ТЭ — топливный элемент

УОВ — угол опережения впрыскивания
УОЗ — угол опережения зажигания
ФГР — фазы газораспределения
ХХ — холостой ход
ЭБУ — электронный блок управления
ЭГНФ — электрогидравлическая насос-форсунка
ЭГФ — электрогидравлическая форсунка
ЭМК — электромагнитный клапан

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный учебник подготовлен коллективом авторов, много лет работающих на кафедре «Теплотехника и автотракторные двигатели» и в Проблемной лаборатории транспортных двигателей Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). Материал учебника базируется на систематизации последних достижений в области теории и конструирования автомобильных двигателей, опубликованных в различных литературных источниках, а также на собственных исследованиях и разработках авторов. По сути, этот учебник является продолжением серии учебников по ДВС, написанных преподавателями кафедры и изданных на многих языках. Они получили высокую оценку научной и педагогической общественности и неоднократно переиздавались.

Учебник базируется на более чем столетних традициях отечественной школы двигателистов и включает в себя все новое и значимое, что было достигнуто мировым двигателестроением в последние годы.

Глубокое понимание принципов работы ДВС и путей их дальнейшего совершенствования является главным требованием к современному специалисту в области эксплуатации автомобильного транспорта и сервиса.

Учебник является компонентом учебно-методического комплекса «ДВС», включающего в себя также пособие «Автомобильные двигатели. Курсовое проектирование» (Изд. центр «Академия», 2012 г.), а также компьютерный Интегрированный обучающий комплекс «Двигатели внутреннего сгорания» (ИОК «ДВС»), удостоенный премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники. Последний содержит компьютерные лекции, лабораторный практикум, САПР для проектирования, пакет моделирования и исследования процессов в ДВС.

Постоянный рост сложности и многообразия технических решений, используемых в современных ДВС, обусловливает увеличение объема соответствующей информации. При написании данного учебника была поставлена цель — дать в сжатой и доступной форме базовые знания студентам о современных автомобильных ДВС, необходимые специалисту, бакалавру и магистру для грамотной эксплуатации и сервиса автотранспортных средств.

Для достижения этой цели авторы отказались от рассмотрения в данном учебнике процессов и отдельных конструктивных решений, которые неактуальны для современных ДВС или реализуются в ограниченном объеме.

Информация в виде справочных данных о выпускаемых ДВС, выборе геометрии деталей и характеристик материалов, используемых в двигателестроении, а также расчетные зависимости, необходимые для курсового проектирования ДВС, даны в учебном пособии «Автомобильные двигатели. Курсовое проектирование».

Для обеспечения возможности более глубокого рассмотрения отдельных вопросов в учебнике даны ссылки на дополнительные источники информации, в частности на [1 ... 3].

Также более полную информацию о современных ДВС можно получить, используя ИОК «ДВС», демоверсия которого представлена на сайте www.tiatd.ru кафедры ТиАТД МАДИ. Настоящий учебник совместно с ИОК «ДВС» в значительной степени адаптирован для самостоятельной работы студентов.

Учебник может использоваться студентами высших учебных заведений (прежде всего для специальностей в области эксплуатации и сервиса автомобилей) в полном объеме или фрагментарно практически для всех специальностей, обеспечивающих потребности транспортной энергетики (по направлению «Наземные транспортные системы» по специальностям «Автомобиле- и тракторостроение», «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Машины инженерного вооружения»; по направлению «Энергомашиностроение» по специальности «Двигатели внутреннего сгорания»; по направлению «Технологические машины и оборудование» по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование»; по направлению «Эксплуатация транспортных средств» по специальности «Сервис и техническая эксплуатация транспортных и технологических машин и оборудования» (автомобильный транспорт; строительное, дорожное и коммунальное машиностроение); по направлению «Организация перевозок и управление на транспорте» по специальностям «Организация перевозок и управление на транспорте (автомобильный транспорт)», «Организация и безопасность дорожного движения (автомобильный транспорт)»; по направлению «Экономика и управление» по специальности «Экономика и управление по предприятии (на транспорте, в строительстве)».

Авторы выражают благодарность за ценные советы рецензентам учебника — коллективу кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н. Э. Баумана (зав. кафедрой заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. Н. А. Иващенко) и д-ру техн. наук, проф. Н. А. Волкову.

Общее руководство работой и редактирование рукописи осуществлял д-р техн. наук, проф. М. Г. Шатров с помощью канд. техн. наук, проф. К. А. Морозова и д-ра техн. наук, проф. И. В. Алексеева.

Отдельные разделы книги написали: Шатров М. Г. — предисловие, введение, подразд. 1.2, 1.8, 6.1, 7.2.1 ... 7.2.3, 7.3 (совместно с Богдановым С. Н.); Алексеев И. В. — подразд. 1.1, 1.3 ... 1.7, 3.2.2, 6.2, 6.3, 7.1, 7.2.4; Морозов К. А. — подразд. 2.1, 2.3, 2.4, 3.1 (совместно с Хачияном А. С.), 3.2.1, 4.1, 9.2; Хачиян А. С. — подразд. 2.2, 5.3.3, 9.1.1 ... 9.1.6; Пришвин С. А. — подразд. 5.1, 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.3.1, 5.3.2, 5.4.1, 5.4.2, 5.5; Голубков Л. Н. — подразд. 4.2; Горшков Ю. В. — подразд. 8.1, 8.2; Черняк Б. Я. — подразд. 4.3; Синявский В. В. — подразд. 5.4.3, 8.3, 9.2.3.

ВВЕДЕНИЕ

Наша цивилизация живет в преддверии глобального энергетического и экологического кризисов, обусловленных ростом потребностей человечества в энергии и несовершенством средств преодоления отрицательных последствий ее использования. ***Повышение благосостояния и уровня жизни*** людей непосредственно зависят от потребления энергии на душу населения в стране. В значительной мере этот фактор вызывает всевозрастающие потребности современного общества в транспортных перевозках. Необходимость осуществления больших объемов грузовых и пассажирских перевозок обусловливает *увеличение численности автомобильного парка* и *рост интенсивности его использования*.

Основные ***требования к транспортным энергоустановкам*** сводятся к следующим: высокие качество и эффективность функционирования в составе автомобиля при перевозках, обеспечение безопасности выполнения транспортных услуг, создание транспортного комфорта и сохранности грузов при транспортировке, минимальное отрицательное воздействие на окружающую среду, сохранение природных (топливно-энергетических) ресурсов за счет минимизации затрат труда, расхода эксплуатационных материалов и энергии при их производстве и в процессе эксплуатации. Выполнение этих требований обусловливает определенные особенности современной автомобилизации.

Топливо. В ближайшем будущем топлива нефтяного происхождения останутся основными энергоносителями для ДВС. Однако уже сейчас на фоне роста потребностей общества в энергоносителях очевидна ограниченность имеющихся энергетических и материальных ресурсов. Наметилась реальная перспектива истощения невозобновляемых природных энергетических ресурсов. Исходя из сказанного понятно, что необходимо повышать эффективность использования топлива за счет повышения экономичности автомобиля, а также искать возможности применения перспективных топлив. Актуальны работы по использованию смесей топлив нефтяного происхождения и альтернативного. При этом важно учитывать требования и особенности эксплуатации автомобилей в определенных регионах, а также наличие в разных регионах тех или иных топлив (в мегаполисе, сельской местности и т. п.).

Спрос на энергию будет постоянно расти. По мере истощения запасов нефти и вследствие необходимости обеспечения требуе-

мого качества нефтепродуктов будет расти их стоимость. Ограниченность невозобновляемых энергетических и материальных ресурсов предполагает постоянное проведение работ по поиску перспективных альтернативных видов топлив и адаптации под них энергоустановок автомобилей. К перспективным *альтернативным* топливам относятся природный газ, спирты, синтетические топлива, эфиры (диметиловый и из рапсового масла), которые производятся из органических материалов растительного происхождения. В настоящее время происходит активное их включение в качестве компонентов смесевых топлив, т. е. предусматривается совместное использование их с бензином или дизельным топливом.

Экологические свойства автомобиля. Для выполнения все более ужесточающихся требований к вредным выбросам и шуму автомобилей, регламентируемых государством, следует значительно повысить экономические и экологические показатели двигателей. Для энергоустановок автотранспортных средств первостепенную значимость имеют минимальный удельный расход топлива, выбросы оксидов азота и углерода, полициклических ароматических углеводородов (а для дизелей — частиц), допустимый уровень шума. Снижения выбросов вредных веществ автомобильными двигателями можно достичь: воздействием на рабочий процесс (смесеобразование и сгорание) и конструкцию двигателя; нейтрализацией токсичных компонентов в выпускной системе двигателя; применением альтернативных (более экологически чистых) топлив; обеспечением нормальных условий эксплуатации автомобиля (режимов движения, технического состояния двигателя и автомобиля, качества топлива и т. д.).

Необходимо отметить, что удовлетворение требований Еврокомиссии для стран Европы к выбросам в атмосферу диоксида углерода, вызывающего потепление климата (вследствие парникового эффекта), предполагает существенное снижение расхода топлива. Традиционные способы реализации данного требования практически исчерпаны. Поэтому сейчас интенсивно разрабатываются нетрадиционные силовые установки для автомобилей.

Безопасное движение автомобиля. В значительной степени выполнение этого требования определяется свойствами энергоустановки автомобиля, надежностью его конструкции и в частности двигателя. При росте числа транспортных средств на дорогах очень важно обеспечить требуемый уровень маневренности автомобиля в различных дорожных ситуациях, что достигается лишь при согласованных характеристиках двигателя и автомобиля. При этом необходимо гарантировать надежную работу ДВС даже при отклонении его технических характеристик от штатных значений, а также при неправильной эксплуатации.

Рост конкурентной борьбы между производителями ДВС. Этот факт определяет требования повышения качества ДВС и резкого сокращения сроков их создания. Поступательное развитие общества привело к резкому росту технологических возможностей для быстрого создания все более совершенных технических систем. Причем сроки морального старения этих систем постоянно сокращаются.

К современному автомобилю предъявляются зачастую противоречивые требования в части обеспечения комфорта и удовольствия от вождения. Например, повысить уровень комфорта можно автоматизацией значительного числа механических операций, однако при этом возрастет потребность в энергии (кондиционирование салона, электростеклоподъемники и т. п.).

Усиливающаяся конкуренция и непрерывно ужесточающиеся требования к экологическим показателям вызывают необходимость постоянного повышения качества ДВС (это в значительной степени определяет покупательский спрос и престиж фирмы), сокращения сроков создания (исследования, проектирования и производства) новых конструкций ДВС, а также снижения издержек на всех стадиях их жизненного цикла (особенно при эксплуатации, так как до 70 % затрат в жизненном цикле автомобиля составляют затраты на топливо). Выполнение этих требований возможно только за счет использования на всех этапах жизненного цикла двигателя (при разработке, изготовлении, эксплуатации, обслуживании, ремонте и утилизации) инновационных технологий, требующих минимальных материальных затрат, энергетических и трудовых ресурсов. С другой стороны, все это обуславливает использование все более сложных технологий и технических решений.

Проанализировав сегодняшнее состояние техники, можно сказать, что основой автотранспортной энергетики в ближайшем будущем останутся поршневые двигатели внутреннего сгорания, которые в процессе своего развития достигли высокого совершенства.

В значительной степени топливная экономичность ДВС, их нагрузка на окружающую среду и работоспособность определяются тем, какими характеристиками они обладают, работая в составе автомобиля, т. е. мощностью, крутящим моментом и т. д.

Для двигателестроения характерны высокая наукоемкость продукции, массовость производства и потребления, наличие большого количества поставщиков комплектующих и материалов, широкая сервисная сеть.

Рассмотренные проблемы можно решить только на основе системного подхода, т. е. используя современный уровень науки о ДВС, достижения в области технологии производства, успехи теории и практики информационных и коммуникационных тех-

нологий. Поэтому очень важен уровень профессиональной подготовки участников жизненного цикла ДВС, а также непрерывное повышение этого уровня.

За более чем столетнюю историю поршневого двигателестроения ситуация не изменилась: ДВС остался основным источником современной мобильности. Однако за последние 15 лет поршневые ДВС резко изменили свой облик: они стали сложными техническими системами.

Рассмотрим основные направления развития и совершенствования современных автотракторных ДВС.

Рабочий процесс и конструкция двигателя. Ведутся работы на основе электронных систем управления по согласованному совершенствованию:

- *газообмена* за счет использования переменных фаз газораспределения и высоты подъема клапанов при увеличении числа клапанов до трех или четырех на цилиндр;
- *топливоподачи* на основе многократного впрыскивания топлива, увеличения давления впрыскивания дизельного топлива, впрыскивания бензина (в том числе и непосредственно в цилиндр);
- *применения наддува*, включая его регулирование;
- *мероприятий по снижению токсичности* за счет применения нейтрализаторов, рециркуляции отработавших газов, фильтров частиц;
- *качества топлива и рабочих жидкостей*, а также разработки двигателей применительно к конкретному топливу.

Использование инновационных технологий. В настоящее время при создании ДВС применяются новые технологии производства конструкционных материалов, их обработки и сборки ДВС, что, в свою очередь, определяет использование новых материалов (в частности, керамики), рабочих тел с заданным уровнем свойств и требуемой долговечностью, алюминиевых цилиндров и др. Новые технологии позволяют обеспечить высокий уровень форсированности двигателя и технологичности его конструкции.

Реализация современных информационных и коммуникационных технологий при создании промышленных изделий позволила сформировать так называемые CALS-технологии, обеспечивающие новый уровень информационной поддержки всех этапов жизненного цикла ДВС. Эти технологии направлены в первую очередь на повышение эффективности управления информационными ресурсами предприятия, а также каждым конкретным ДВС в процессе его эксплуатации, диагностики (в том числе на борту автомобиля) и для выполнения грамотного технического обслуживания.

В мире интенсивно ведутся работы по созданию комбинированных (гибридных) энергетических установок, представляющих собой синтез поршневого и электрического двигателей, двигателей, работающих на водороде, а также установок по прямому преобразованию топлива в электрическую энергию (топливных элементов). Прогнозируемое время широкого использования данных разработок от ближайшего будущего до 15...25 лет.

Также активно прорабатываются варианты утилизации теплоты, отводимой охлаждающей жидкостью и отработавшими газами.

Чрезвычайно важны вопросы эффективной утилизации выведенных из эксплуатации автомобилей и в частности ДВС.

Управление. Развитие поршневых ДВС по ряду их свойств достигло предела. Функционирование современного автомобиля и его силовой установки невозможно без комплексного управления рабочими процессами всех их элементов с использованием современных информационных и коммуникационных технологий.

В современном двигателе это обеспечивается использованием автоматической системы управления рабочими процессами, включающей в себя: совокупность датчиков, обеспечивающих получение информации, необходимой для управления; электронный блок управления, формирующий на основе полученной от датчиков информации управляющие воздействия; исполнительные устройства, реализующие управляющие воздействия по сигналам, поступающим от блока управления.

Система управления реализует эффективную работу ДВС на всех режимах, диагностику отклонений его работы от штатных параметров и соответственно возможную их коррекцию. Основные направления работы этой системы следующие: 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.

Механизмы управления процессами газообмена в современных ДВС обеспечивают выполнение все более широких функций, в частности, формирование внешней скоростной характеристики (оптимизацию наполнения на нескольких режимах или во всем рабочем диапазоне частот вращения коленчатого вала посредством изменения объема впускного тракта) и управление нагрузочными режимами работы (регулирование мощности двигателя посредством использования в конструкции устройств управления фазами газораспределения и регулирования высоты подъема клапанов).

Аналогично строится работа систем смазывания и охлаждения ДВС.

Все шире в двигателях применяется электрический привод вентилятора и топливного насоса (в ДсИЗ), ТНВД (в дизеле),

масляного насоса, клапанного узла и нагнетателя наддувочного воздуха, но при этом требуется наличие на автомобиле все более мощных источников электрической энергии.

Сегодня активно ведутся работы по созданию конструкций ДВС, позволяющих управлять изменением их рабочего объема, варьировать степень сжатия топлива, отключать часть цилиндров или отдельные рабочие циклы.

Особенности эксплуатации двигателей. Основными факторами, обеспечивающими штатное функционирование двигателя и его надежность, являются: соблюдение инструкций по эксплуатации и интервалов технического обслуживания (ТО); использование качественного топлива; применение технических жидкостей (масла и антифриза), соответствующих требованиям производителя; использование оригинальных запасных частей; квалификация технического персонала, эксплуатирующего и обслуживающего двигатель.

Имеющаяся в России статистика отказов двигателей показывает, что в 80 % случаев они происходят из-за использования некачественного топлива, в 14 % — некачественных технических жидкостей и лишь 6 % приходится на прочие обстоятельства.

Примерами нарушений при эксплуатации являются: наличие воды и тяжелых примесей в топливе; применение некачественных рабочих жидкостей, масла или воды (вместо антифриза); несоблюдение регламента ТО; использование неоригинальных запчастей.

Защита двигателей от некачественного топлива обеспечивается: установкой в топливную систему дизелей дополнительных фильтров-сепараторов с датчиками присутствия воды и регулярным их обслуживанием; использованием дополнительных емкостей для предварительного отстоя дизельного топлива перед заправкой в бак двигателя; применением специальных приборов для предварительного контроля качества топлива.

При регламентном обслуживании двигателей допускается использование только технических жидкостей, рекомендованных заводом-изготовителем, причем замену их необходимо производить в строго определенные сроки.

Охлаждающая жидкость должна проверяться по составу как минимум один раз в год (обычно перед наступлением холодного сезона), а ее замена должна проводиться не реже, чем один раз в два года. Использование антифризов, содержащих метанол, не допускается. Применяемый антифриз должен соответствовать соответствующим стандартам.

Использование оригинальных комплектующих (запасных частей) обеспечивает качество работы двигателей, их оптимальные рабочие характеристики и функциональную совместимость с

другими компонентами, а также безопасность, безаварийность работы, удобство монтажа, наличие гарантии и ее сохранение в целом на двигатель. В России каналы поставок запасных частей очень разнообразны, т.е. их поступление возможно как от дистрибьюторов и производителей двигателей и оригинальных или запатентованных комплектующих (например, системы питания или ТНВД), так и от продавцов аналогов, подходящих запасных частей, подделок и копий. При этом любой компонент, не соответствующий заводской спецификации, который может быть дешевле оригинала, оказывает негативное воздействие на работу двигателя.

Риски при использовании неоригинальных комплектующих следующие: высокая вероятность ошибки при их подборе; рассогласованная работа элементов двигателя (потеря мощности, увеличение расходов масла и топлива, затрудненный пуск, дымность, превышение норм вредных выбросов, повышение вибрации); необходимость дополнительных настроек (например, ТНВД и турбокомпрессоров); высокая вероятность выхода двигателя из строя; снижение ресурса двигателя вследствие преждевременного износа его компонентов; сложность монтажа, уменьшение интервалов ТО; необходимость повторного поиска деталей и дополнительные затраты, а также увеличение времени простоя техники; отказ в период гарантии.

В общем виде основную задачу инженера-эксплуатационника автомобилей по отношению к их энергетическим установкам можно сформулировать следующим образом: грамотная эксплуатация транспортного средства в процессе его функционирования и качественное техническое обслуживание, а также быстрое устранение возникших неисправностей в соответствии с регламентом, предписанным заводом — изготовителем этой установки.

Глава 1
ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЕЙ

1.1. Элементы классификации автомобильных двигателей

Энергетическая установка автомобиля, преобразующая теплоту сжигаемого в ней топлива в работу, называется *тепловым двигателем*.

Специфика использования теплового двигателя на автомобиле подразумевает необходимость сохранения им работоспособности при изменении положения в пространстве, а также обеспечения эффективного функционирования при изменении в широких пределах скоростного и нагрузочного режимов работы. К нему также предъявляются высокие требования по габаритным размерам и массе. Все перечисленное является характерным и определяющим для *транспортных двигателей*.

Тепловой двигатель, в котором сжигание топлива, выделение теплоты и преобразование ее части в механическую работу происходит непосредственно в его расширительном устройстве (цилиндре, турбине и т.д.), а рабочее тело циклически обновляется, называется *двигателем внутреннего сгорания*.

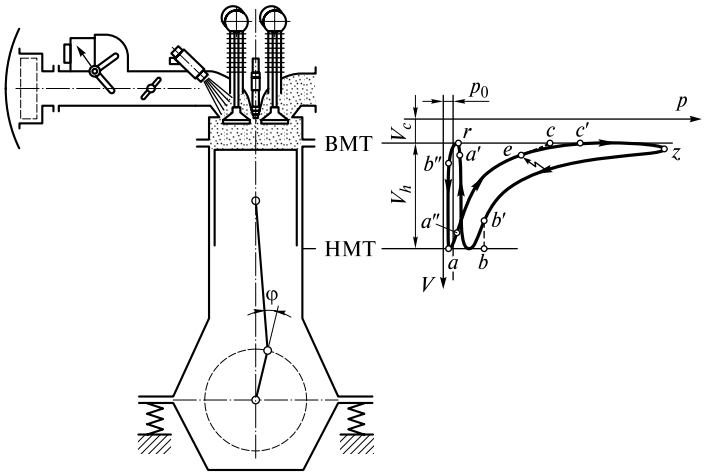
В расширительном устройстве подавляющего большинства автомобильных двигателей применяются движущиеся возвратно-поступательно поршни, поэтому их относят к категории *поршневых двигателей внутреннего сгорания*.

Совокупность процессов впуска, сжатия, сгорания, расширения и выпуска рабочего тела образует *рабочий цикл* двигателя.

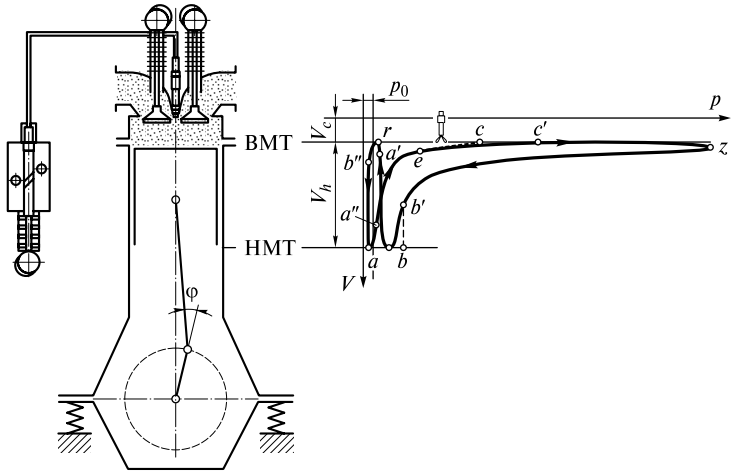
В ДВС в основном используется *жидкое* (бензин, дизельное топливо) или *газовое* (природный или генераторный газ) *углеводородное топливо*.

По способу воспламенения топливовоздушной смеси (ТВС) различают автомобильные двигатели *с принудительным* (преимущественно *искровым*) *зажиганием* (ДсИЗ) и *с воспламенением от сжатия* — дизели. Оба типа двигателей широко используются в современных автомобилях.

Типичные конструктивные схемы ДсИЗ и дизеля приведены на рис. 1.1. Показанный на рис. 1.1, *а* ДсИЗ относится к классу ДВС *с внешним смесеобразованием* и *количественным регулированием мощности*. Его рабочий цикл характеризуется следующими



а



б

Рис. 1.1. Принципиальные схемы поршневых автомобильных двигателей и их индикаторные диаграммы:

а — бензинового с искровым зажиганием; *б* — дизеля

особенностями. Топливовоздушная смесь образуется во впускной системе двигателя (внешнее смесеобразование), для чего топливо вводится в воздушный поток либо с помощью форсунки, либо карбюратором. Для обеспечения регулирования мощности необходимое изменение дозы топлива для одного рабочего цикла (цикловая подача топлива) достигается изменением количества ТВС с помощью дроссельной заслонки (дросселя), установленной во впускном трубопроводе, при мало изменяющемся качестве смеси — относительном содержании в ней топлива и воздуха. В настоящее время все большее распространение получают ДсИЗ, в которых в процессе впуска цилиндр заполняется только воздухом, а ТВС образуется внутри цилиндра при впрыскивании в него бензина (внутреннее смесеобразование). В дизеле ТВС подготавливается внутри цилиндра при впрыскивании в него топлива в конце такта сжатия. Поэтому дизель относится к двигателям *с внутренним смесеобразованием*. В нем для регулирования мощности изменяется цикловая подача топлива при мало изменяющемся количестве свежего заряда, заполняющего цилиндры к концу процесса впуска. При этом изменяется качество смеси, поэтому дизель относится к двигателям *с качественным регулированием*.

По способу организации рабочего цикла в ДВС различают двигатели *четырехтактные* и *двухтактные*. Такт — это совокупность процессов, происходящих в цилиндре двигателя при перемещении поршня от верхней мертвой точки (V_c) до нижней (V_a), или наоборот (см. рис. 1.1). При этом в первом случае совокупность процессов, формирующих рабочий цикл, реализуется за четыре такта, а во втором — за два.

Автомобильные двигатели различаются также по способу наполнения цилиндров свежим зарядом. В двигателях без наддува, свежий заряд в процессе впуска поступает в цилиндры под действием перепада давлений между атмосферой и внутрицилиндровым пространством. В наддувных модификациях двигателей свежий заряд нагнетается в цилиндры под давлением, что при прочих равных условиях позволяет получить дополнительную мощность за счет соответствующего увеличения цикловой подачи топлива.

Многоцилиндровые двигатели автомобилей классифицируются по способу компоновки цилиндров. По этому признаку различают двигатели:

- *рядные* с линейным расположением цилиндров;
- *V-образные* с двумя рядами цилиндров, оси которых расположены под углом γ, называемым углом развала (при $\gamma = 15°$ — VR-образные двигатели, при $\gamma = 180°$ — оппозитные);
- *W-образные*, представляющие собой объединение двух VR-образных двигателей, поперечные оси симметрии которых

находятся под углом друг к другу, обеспечивающим при данном числе цилиндров равномерное чередование рабочих ходов.

Практически все современные автомобильные двигатели относятся к категории *быстроходных*, имеющих среднюю скорость поршня более 10 м/с на режиме номинальной мощности (см. подразд. 1.4).

1.2. Состав и структура поршневого двигателя внутреннего сгорания

Поршневой двигатель — это сложная техническая система. Рассмотрим компоненты, обеспечивающие эффективное функционирование этой системы на всех режимах в составе автомобиля (рис. 1.2).

Кривошипно-шатунный механизм (КШМ). Предназначен для преобразования индикаторной работы, получаемой в цилиндре при сгорании топлива, в *эффективную* работу, отдаваемую потребителю. Состоит из корпусных и подвижных деталей.

Корпусные детали, представляющие остов двигателя, состоят из блока цилиндров, объединяющего отдельные цилиндры в соответствии с принятым способом их компоновки, и картера (в единой отливке — блок-картер *19*), а также головки цилиндров *18*. Цилиндр необходим для обеспечения перемещения поршня. Поршень в своем верхнем мертвом положении совместно с головкой цилиндра *18* образует камеру сгорания (КС) требуемой формы. В головке цилиндра располагаются элементы механизма газораспределения, обеспечивающего смену рабочего тела в камере сгорания, т.е. клапанный узел и компоненты его привода. В ней также установлены элементы системы питания топливом — форсунки *6*, а в ДсИЗ — катушки и свечи зажигания *24*.

Для размещения коленчатого вала в опорах используется *картер* (*19*, *27*, *29*). На него также крепят другие элементы двигателя. Нижняя часть картера — масляный поддон *29* в автотракторных двигателях, как правило, используется в качестве резервуара для хранения масла. Иногда этот поддон делают достаточно жестким в целях усиления корпуса. Для установки двигателя на раме или кузове автомобиля и уменьшения передачи колебательной энергии между ними на картере располагаются упругие опоры, формирующие подвеску двигателя.

Подвижные детали КШМ преобразуют возвратно-поступательное перемещение поршней *11*, передающееся через шатуны *13* на коленчатый вал *16*, во вращательное движение элементов

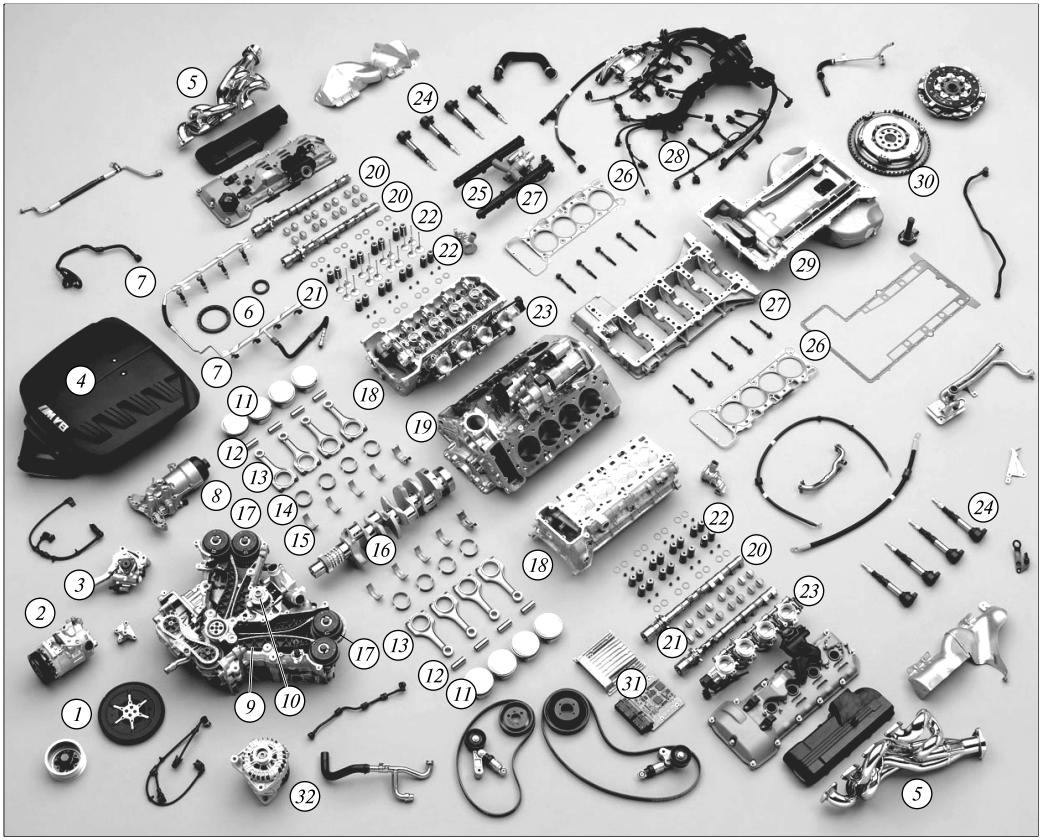


Рис. 1.2. Состав и структура ДВС:

1 — демпфер крутильных колебаний; *2* — компрессор кондиционера; *3* — масляные насосы; *4* — фильтры для очистки воздуха; *5* — выпускные коллекторы; *6* — форсунки; *7* — коллекторы подвода топлива к форсункам; *8* — фильтры для очистки масла; *9* — ремень привода ГРМ; *10* — жидкостный насос; *11* — поршни; *12* — поршневые пальцы; *13* — шатуны; *14* — комплекты колец; *15* — вкладыши коренных опор; *16* — коленчатый вал с противовесами; *17* — устройства управления клапанами; *18* — головки цилиндров; *19* — блок-картер; *20* — распределительные валы; *21* — клапаны; *22* — пружины; *23* — блоки дроссельных заслонок; *24* — катушки и свечи зажигания; *25* — впускные трубопроводы; *26* — прокладки блока цилиндров; *27* — блок крышек коренных опор коленчатого вала; *28* — жгут проводов; *29* — масляный поддон; *30* — маховик; *31* — электронный блок управления; *32* — генератор

трансмиссии автомобиля. Поршень и шатун соединяются поршневым пальцем *12*.

Для герметизации внутрицилиндрового пространства, т.е. для предотвращения прорыва газов из камеры сгорания в картер и попадания в цилиндр избыточного количества масла, используется комплект компрессионных и маслосъемных колец *14*.

На хвостовике коленчатого вала крепится маховик *30*, повышающий равномерность его вращения. Для уменьшения крутильных колебаний отдельных элементов коленчатого вала относительно его оси на носке вала устанавливается демпфер *1*.

От коленчатого вала осуществляется привод большинства элементов двигателя (механизма газораспределения, жидкостного и масляного насосов, генератора и др.).

Для уравновешивания инерционных нагрузок на элементы коленчатого вала *16* и подвеску двигателя на вале предусматриваются противовесы, а при необходимости в картере располагается специальный уравновешивающий механизм.

Механизм газораспределения (МГР). Предназначен для управления процессами наполнения ДВС свежим зарядом и его очистки от отработавших газов. В автотракторных ДВС управление потоками рабочего тела при газообмене производится в основном с помощью клапанов *21*, расположенных в головке цилиндра. На одном цилиндре может быть от двух до четырех и более клапанов. Закон движения клапанов задается кулачками распределительного вала *20*, которые воздействуют на клапаны либо непосредственно через коромысло или рычаг, либо с помощью толкателя, штанги и коромысла. Для удержания клапана в закрытом состоянии и предотвращения разрыва кинематической связи между элементами МГР используются объединенные с клапанами замковыми устройствами пружины *22*, которые формируют клапанный узел. Кулачки компонуются на распределительном валу (валах), которые приводятся во вращение от коленчатого вала с помощью шестерен, ремня *9* или цепи. В ряде случаев для улучшения работы двигателя в МГР предусматриваются устройства *17*, управляющие моментами открытия и закрытия клапанов (фазами газораспределения), а также высотой их подъема.

Система питания топливом. Предназначена для подачи необходимого количества топлива в двигатель, организации его смесеобразования и сгорания. В общем виде она содержит бак для хранения топлива, фильтр для его очистки, трубопроводы, топливный насос и форсунки *6*, предназначенные для дозирования, подачи и распыливания топлива в КС, а также ряд датчиков, определяющих состояние ДВС. В дизеле и в современных ДсИЗ имеются два насоса (подкачивающий и высокого давления), а в ряде систем — резервуар, где топливо содержится под высоким давлением — аккумулятор.

Смазочная система. Необходима для снижения потерь на трение и износ трущихся поверхностей подвижных деталей ДВС, а также для отвода выделяющейся теплоты в трущихся парах и выноса из них продуктов износа. В системе имеется резервуар для хранения масла — масляный поддон *29*, насос(ы) *3* для его подачи, фильтры для очистки *8*, каналы и магистрали для подвода к трущимся элементам двигателя (например, опорам коленчатого, распределительных валов), радиатор для охлаждения масла, а также клапаны, регулирующие работу системы. Масло в высокофорсированных двигателях может использоваться для охлаждения поршня посредством подачи на его днище или ввода во внутреннюю полость.

Система охлаждения. Обеспечивает требуемое тепловое состояние двигателя и включает в себя жидкостный насос *10* для принудительной циркуляции охлаждающей жидкости в рубашке охлаждения, сформированной вокруг наиболее нагретых элементов двигателя, и радиатор для отвода теплоты от охлаждающей жидкости в атмосферный воздух, прокачиваемый через него при движении автомобиля и с помощью вентилятора. Регулирование работы системы осуществляется на основе сигналов датчика температуры с помощью термостата, изменяющего контур циркуляции охлаждающей жидкости, т.е. пропускающего ее, минуя радиатор.

Система воздухопитания. Содержит фильтр(ы) *4* для очистки поступающего воздуха, который также используется как глушитель шума, генерируемого при впуске, а в ДсИЗ и дроссельную заслонку *23*.

Повышать мощность двигателя можно увеличением количества топлива, подаваемого в цилиндр. Для полного сгорания этого топлива необходимо вводить в цилиндр дополнительное количество воздуха, что обеспечивается с помощью специальных агрегатов наддува, включающих в себя нагнетатель (компрессор) для сжатия воздуха и привод (либо от газовой турбины, либо от коленчатого вала).

Система выпуска. Содержит выпускные коллекторы *5*, глушители шума выпуска, нейтрализатор отработавших газов, а в дизелях — фильтр для улавливания частиц, включая сажу, и ряд датчиков, обеспечивающих работу двигателя.

Система управления двигателя. Является составной частью системы управления автомобиля. Содержит набор датчиков, фиксирующих состояние двигателя, и электронный блок управления *31*, вырабатывающий по заданному алгоритму управляющие сигналы для исполнительных устройств, обеспечивающих необходимую работу двигателя в составе автомобиля (например, изменение фаз газораспределения, подачу топлива и др.). В качестве источника питания используется аккумуляторная батарея,

заряжаемая генератором *32*, приводимым в действие от коленчатого вала двигателя.

Система зажигания. В двигателе с искровым зажиганием эта система осуществляет создание искровых разрядов для воспламенения топлива с помощью катушек и свечей *24* в его цилиндрах в соответствии с порядком их работы.

Система пуска. Обеспечивает надежный и быстрый пуск ДВС в различных эксплуатационных условиях. Включает в себя стартер и устройства, ускоряющие прогрев двигателя.

1.3. Рабочие циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания

1.3.1. Рабочий цикл бензинового двигателя с искровым зажиганием

Совокупность последовательно чередующихся в цилиндре процессов впуска (наполнения), сжатия, сгорания, расширения и выпуска формирует *рабочий цикл* двигателя.

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

В качестве топлива для ДсИЗ используется бензин, представляющий собой смесь низкокипящих углеводородов, низшая теплота сгорания которых H_u = 44 МДж/кг (см. подразд. 1.8.2). Для полного сжигания 1 кг этого топлива необходимо минимальное количество окислителя — кислорода, содержащееся в 14,9 кг воздуха. Регулирование работы, производимой за рабочий цикл двигателя, осуществляется посредством изменения положения дроссельной заслонки.

Топливовоздушная смесь в зависимости от режима работы двигателя имеет различное относительное содержание топлива и воздуха, т.е. различное качество. Состав смеси оценивается *коэффициентом избытка воздуха* α, который представляет собой отношение количества воздуха, содержащегося в смеси в цилиндре после закрытия впускного клапана, к минимальному количеству воздуха, необходимого для полного сгорания всего находящегося в смеси топлива. При $\alpha < 1$ (богатая топливом смесь) воздуха в ТВС меньше, чем необходимо для полного сгорания находящегося в ней топлива. При $\alpha > 1$ (бедная топливом смесь) в ТВС имеется избыток воздуха. На разных режимах работы ДсИЗ коэффициент α может изменяться от 0,75 до 1,2.

Рабочие процессы двигателя принято анализировать по *индикаторной диаграмме*, представляющей собой зависимость давления p в цилиндре двигателя от текущего объема V пространства над поршнем (см. рис. 1.1, *а*).

Первый такт работы двигателя — впуск — реализуется при повороте кривошипа коленчатого вала (ПКВ) от 0 до 180°, что соответствует перемещению поршня от верхней мертвой точки (ВМТ) до нижней мертвой точки (НМТ). При этом объем надпоршневого пространства изменяется от V_c (объема камеры сгорания) до $V_a = V_c + V_h$ (полного объема цилиндра). Объем V_h называется *рабочим объемом цилиндра*.

Применительно к рабочему циклу поршневого двигателя понятия «такт» и «процесс» не совпадают, поскольку для лучшей организации процессов газообмена впускные и выпускные клапаны открываются до начала соответствующих тактов (в точках a' и b') и закрываются после их завершения (в точках a'' и b''), а искровый разряд в свече зажигания (начало процесса сгорания) происходит до завершения такта сжатия (в точке f).

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 *ra* на диаграмме) происходит из-за разрежения, создаваемого поршнем, движущимся в сторону НМТ.

Давление p_a в конце такта впуска (в точке *а*) определяется уровнем гидравлических потерь во впускном тракте, значение которых зависит от скоростного и нагрузочного режимов работы (от скорости перемещения ТВС по впускному тракту и от степени открытия дроссельной заслонки). На режиме номинальной мощности, т. е. когда дроссельная заслонка открыта полностью и частота вращения коленчатого вала равна номинальной (см. подразд. 1.7), для безнаддувного ДсИЗ $p_a = 0{,}08 \ldots 0{,}09$ МПа.

На температуру T_a влияют теплообмен свежего заряда с элементами двигателя, формирующими впускную систему и камеру сгорания, и его охлаждение вследствие испарения топлива. Для повышения полноты испарения иногда используется специальный подогрев ТВС во впускном трубопроводе либо горячей жидкостью из системы охлаждения, либо отработавшими газами. Температура свежего заряда в цилиндре увеличивается также вследствие перемешивания его с горячими остаточными газами. На режиме номинальной мощности в двигателе с искровым зажиганием превалирует подогрев свежего заряда, и $T_a = 320 \ldots 380$ К.

Чем больше уровень гидравлических потерь, выше подогрев свежего заряда, больше количество продуктов сгорания, оставшихся в цилиндре двигателя от предыдущего цикла, тем меньше свежего заряда поместится в нем к концу процесса впуска.

Второй такт работы двигателя — сжатие — осуществляется при повороте кривошипа на угол φ от 180 до 360° (линия *ac* на диаграмме). На параметры рабочего тела в конце процесса сжатия (в точке *c*) в основном влияют их начальные значения (p_a, T_a) и степень сжатия ε, равная отношению объемов V_a и V_c ($\varepsilon = V_a/V_c$).

При значениях ε = 7,5 ... 12, характерных для современных бензиновых двигателей, p_c = 1,2 ... 2,4 МПа, T_c = 600 ... 900 К. Максимальное значение ε ограничивается детонацией (см. подразд. 2.1.4).

При реализации рабочего цикла давление в конце такта сжатия p'_c больше p_c, т. е. $p'_c = (1{,}15 \ldots 1{,}25)p_c$, что является следствием начавшегося процесса сгорания. Точка *f* соответствует моменту искрового разряда в свече зажигания. Угловой интервал (в градусах поворота коленчатого вала — ПКВ) от момента подачи искры до прихода поршня в ВМТ называется *углом опережения зажигания* ($\varphi_{о.з}$).

Третий такт работы двигателя — расширение (φ от 360 до 540° ПКВ) — включает в себя сгорание основной доли поданного в цилиндр топлива, расширение рабочего тела и выполнение полезной работы.

После ВМТ при повороте кривошипа на угол $\varphi_z = 10 \ldots 15°$ давление в цилиндре достигает максимального значения $p_z = 4 \ldots 8$ МПа и соответственно возрастает температура рабочего тела до значения $T_z = 2\,500 \ldots 2\,850$ К. Отношение $\lambda = p_z/p_c$ называется *степенью повышения давления*. Для современных двигателей с искровым зажиганием λ = 3,2 ... 4,2. По завершении такта расширения p_b = = 0,35 ... 0,50 МПа, T_b = 1 200 ... 1 700 К.

Следует заметить, что в рабочем цикле работы получают несколько меньше из-за раннего открытия выпускного клапана до прихода поршня в НТМ.

Четвертый такт работы двигателя — выпуск (φ от 540 до 720° ПКВ) — осуществляется при давлении $p_r = 0{,}105 \ldots 0{,}12$ МПа, зависящем от уровня гидравлических потерь в выпускной системе. Отработавшие газы выходят из цилиндра при $T_r = 900 \ldots 1\,100$ К.

1.3.2. Рабочий цикл четырехтактного дизеля

Основной вид топлива, используемого в дизелях, — дизельное топливо — представляет собой смесь более высококипящих, чем в бензинах, углеводородов. Низшая теплота сгорания этого топлива H_u = 42,5 МДж/кг. Для полного сжигания 1 кг такого топлива необходимо минимальное количество кислорода, содержащееся в 14,45 кг воздуха. Регулирование работы, производимой за рабочий

цикл двигателя, осуществляется изменением количества впрыскиваемого топлива. Особенности процессов смесеобразования и сгорания в дизеле позволяют для изменения нагрузки варьировать коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1{,}4 \ldots 4$ (до 6).

В целях обеспечения температуры, достаточной для надежного самовоспламенения впрыскиваемого топлива, степень сжатия в дизелях должна быть намного больше, чем в двигателях с искровым зажиганием. Поэтому у дизеля $\varepsilon = 14 \ldots 23$.

Типичная индикаторная диаграмма четырехтактного безнаддувного дизеля приведена на рис. 1.1, *б*. (Большинство современных автомобильных дизелей имеет наддув.)

За первые 180° ПКВ такого двигателя реализуется *такт впуска*. Особенности протекания процесса наполнения цилиндров свежим зарядом (в дизеле это воздух) и значения параметров рабочего тела в конце этого такта (в точке *a*) определяются следующими факторами:

- гидравлические потери во впускной системе дизеля заметно меньше, чем в двигателях с искровым зажиганием, имеющих дроссельную заслонку и диффузор в карбюраторном двигателе, и они не изменяются при варьировании нагрузки на двигатель;
- во впускной системе нет отвода теплоты на испарение топлива ввиду отсутствия последнего в свежем заряде дизеля, следовательно, отпадает необходимость в специальном подогреве впускного трубопровода.

По этим причинам давление в конце такта впуска (в точке *a*) в дизеле больше, чем в ДсИЗ, т. е. здесь $p_a = 0{,}085 \ldots 0{,}095$ МПа. При наддуве p_a может возрастать до 0,20 МПа, а T_a до 360 К.

Температура T_a в дизеле несколько ниже, чем в двигателях с искровым зажиганием ($T_a = 310 \ldots 350$ К), в основном вследствие того, что при больших степенях сжатия к свежему заряду подмешивается относительно меньшее количество отработавших газов (ОГ), имеющих к тому же более низкую температуру.

Особенностью *такта сжатия* в дизеле (φ от 180 до 360° ПКВ) являются более высокие, чем в ДсИЗ, параметры рабочего тела в точке *c* ($p_c = 2{,}9 \ldots 6{,}0$ МПа, $T_c = 700 \ldots 900$ К), что объясняется в основном большей степенью сжатия. При наддуве p_c может возрастать до 8,0 МПа, а T_c до 1 000 К.

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* ($\varphi_{о.\ вп}$).

Вследствие начинающегося еще до ВМТ процесса сгорания давление в цилиндре p'_c превышает значение p_c; $p'_c = (1{,}05 \ldots 1{,}15)p_c$.

Если в ДсИЗ после подачи искры процесс сгорания происходит в условиях заранее подготовленной достаточно однородной

(гомогенной) рабочей смеси, то в дизеле подготовка смеси происходит за короткий промежуток времени от начала подачи топлива. Значительная его часть впрыскивается в цилиндр непосредственно в процессе сгорания. Все это приводит к тому, что вблизи ВМТ в дизеле сгорает существенно меньшая часть всего подаваемого топлива и достаточно большое его количество горит после ВМТ при заметном увеличении объема над поршнем.

Следствием этого в значительной мере является то, что степень повышения давления $\lambda = 1{,}7 \ldots 2{,}2$ меньше, чем аналогичная величина в ДсИЗ. Максимальное давление рабочего цикла в дизеле (в точке z) $p_z = 7{,}5 \ldots 9{,}5$ МПа, а соответствующая температура $T_z = 1\,800 \ldots 2\,200$ К. В дизелях с наддувом значения p_z могут достигать 18 МПа. Более низкие значения T_z по сравнению с бензиновым двигателем являются в основном следствием большего значения коэффициента избытка воздуха α.

Параметры рабочего тела в конце *такта расширения* (в точке b) следующие: $p_b = 0{,}2 \ldots 0{,}4$ МПа, $T_b = 950 \ldots 1\,100$ К, т. е. они ниже, чем в двигателе с искровым зажиганием, вследствие более высокой степени расширения продуктов сгорания.

Такт выпуска (φ от 540 до 720° ПКВ) каких-либо принципиальных особенностей не имеет. Давление в точке r (в конце такта выпуска), определяемое гидравлическими потерями в выпускной системе, $p_r = 0{,}105 \ldots 0{,}12$ МПа, а температура рабочего тела $T_r = 600 \ldots 850$ К, т. е. ниже, чем в ДсИЗ, что объясняется более низкой температурой в конце такта расширения T_b.

1.4. Энергетический баланс и экономико-энергетические показатели двигателей

В рабочем цикле двигателя (рис. 1.3) теплота, вводимая с топливом $Q_т = g_{т.ц}\ H_u$, т. е. теплота, которая могла бы выделиться при полном сгорании всего поданного в цилиндр топлива $g_{т.ц}$ при преобразовании ее в индикаторную работу L_i, сопровождается неизбежными потерями $Q_п$, следовательно, $Q_т = L_i + Q_п$.

Неизбежные потери включают в себя потери теплоты в результате:

- теплообмена между рабочим телом и окружающей средой — $Q_{охл}$ (потери в систему охлаждения);
- аккумулирования теплоты отработавшими газами, удаляемыми из цилиндров $Q_{о.г}$ (потери с отработавшими газами);
- неполноты сгорания топлива $Q_{н.с}$ (потери на неполноту сгорания в основном при $\alpha < 1$).

По определению индикаторная работа L_i представляет собой избыточную работу, совершаемую рабочим телом в цилиндре двигателя за такты расширения и сжатия: $L_i = L_р - |L_{сж}|$.

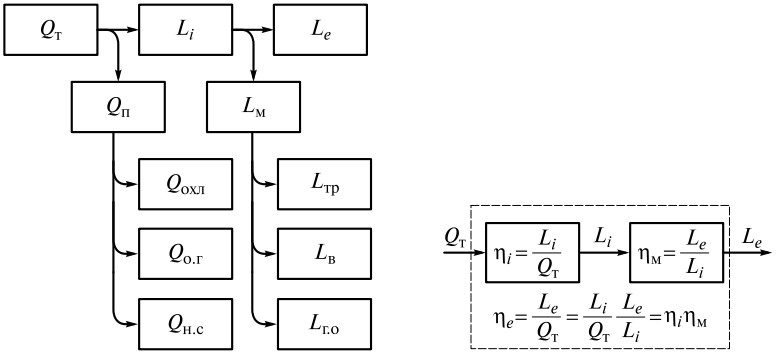


Рис. 1.3. Энергетический баланс поршневого двигателя внутреннего сгорания

На практике в качестве показателя работоспособности цикла используется не индикаторная работа, которая определяется не только совершенством организации рабочих процессов, но и рабочим объемом двигателя, а удельный показатель p_i, который представляет собой индикаторную работу цикла, снимаемую с единицы рабочего объема ($p_i = L_i/V_h$), имеет размерность давления и называется *средним индикаторным давлением*.

Индикаторная работа, получаемая за единицу времени, называется *индикаторной мощностью* $N_i = L_i/\tau_ц$, где $\tau_ц$ — время реализации одного рабочего цикла. Если частота вращения коленчатого вала двигателя n, мин$^{-1}$, то обратная ей величина $1/n$ представляет собой время одного оборота в минутах или $60/n$ — в секундах. В этом случае $\tau_ц = (30/n)\tau$, где τ — коэффициент тактности ($\tau = 2$ для двухтактных двигателей и $\tau = 4$ — для четырехтактных). С учетом того что $L_i = p_i V_h$ при числе цилиндров двигателя, равном i, мощность N_i, кВт, определяется по формуле $N_i = p_i n i V_h/(30\tau)$.

Экономичность рабочего цикла оценивается *индикаторным КПД*, показывающим, какая доля теплоты, введенной с топливом ($Q_т$), преобразуется в индикаторную работу $\eta_i = L_i/Q_т$. Этот показатель характеризует уровень тепловых потерь в двигателе и с учетом приведенных ранее зависимостей его можно записать в виде $\eta_i = 1 - (Q_{охл} + Q_{о.г} + Q_{н.с})/Q_т$. Следовательно, возрастание любого вида потерь теплоты вызывает уменьшение η_i.

Потери в системе охлаждения $Q_{охл}$ наиболее существенно зависят от времени контакта рабочего тела с элементами, формирующими внутрицилиндровое пространство двигателя, и от среднего температурного напора между ними.

Потери теплоты с отработавшими газами $Q_{о.г}$ обусловливаются средней температурой рабочего тела в процессе выпуска и его теплоемкостью, значение которой определяется относительным содержанием в отработавших газах двух- и трехатомных компонентов (теплоемкость первых меньше, чем вторых).

Тепловые потери от неполноты сгорания $Q_{н.с}$ зависят от общего и локального недостатков окислителя в рабочей смеси в объеме камеры сгорания.

Для оценки экономичности двигателя помимо индикаторного КПД большое практическое применение получил параметр, называемый *удельным индикаторным расходом топлива* (g_i), который показывает, какое количество топлива расходует двигатель на производство единицы индикаторной работы: $g_i = g_{т.ц}/L_i$.

Так как $g_{т.ц} = Q_т/H_u$, то $g_i = 1/(H_u/\eta_i)$.

Полностью преобразоваться в эффективную работу L_e, передаваемую на трансмиссию автомобиля, индикаторная работа не может, так как в двигателе неизбежны энергетические потери $L_{м.п}$. Эти потери складываются из потерь на преодоление трения в сопряженных подвижных соединениях $L_{тр}$, потерь на смену рабочего тела в цилиндрах при газообмене $L_{г.о}$ и потерь на привод вспомогательных агрегатов, обеспечивающих функционирование механизмов и систем двигателя, $L_в$.

В совокупности указанные потери называются *механическими*, или *внутренними*.

Следовательно, $L_e = L_i - L_{м.п}$; $L_{м.п} = L_{тр} + L_{г.о} + L_в$.

Уровень внутренних потерь в двигателе оценивается *механическим КПД* $\eta_м = L_e/L_i = 1 - (L_{тр} + L_{г.о} + L_в)/L_i$, определяющим, какая доля индикаторной работы преобразуется в эффективную работу. Возрастание в зависимости от особенностей конструкции и режима работы двигателя любого из видов внутренних потерь приводит к уменьшению его механического КПД.

Потери на трение $L_{тр}$ определяются конструкцией сопряжений двигателя, в которых они традиционно высоки (например, при взаимодействии элементов поршневой группы и цилиндра, а также в клапанном узле механизма газораспределения). С учетом особенности трибологических процессов в ДВС (поскольку в основных сопряжениях двигателя имеет место гидродинамический режим трения) энергетические затраты на трение практически не зависят от нагрузки на элементы сопряжений и определяются в основном скоростью их относительного перемещения.

Потери на газообмен зависят от уровня гидравлических потерь в системах газообмена, т.е. от их конструкции и режимов работы двигателя. Потери $L_{г.о}$, также существенно зависящие от оптимальности для данного режима работы двигателя фаз газораспределения, пропорциональны квадрату средней скоро-

сти движения рабочего тела во время газообмена (т. е. квадрату частоты вращения). При этом они мало зависят от нагрузки на двигатель в дизелях и резко изменяются в ДсИЗ с количественным регулированием мощности вследствие вариации уровня гидравлических потерь на впуске при изменении положения дроссельной заслонки.

Эффективная работа и работа внутренних потерь, отнесенные к единице рабочего объема двигателя, называются соответственно *средним эффективным давлением* ($p_e = L_e/V_h$) и *давлением внутренних потерь* ($p_{м.п} = L_{м.п}/V_h$), откуда следует очевидное соотношение $p_e = p_i - p_{м.п}$, МПа. Тогда эффективная мощность $N_e = L_e/\tau_ц = p_e n i V_h/(30\tau)$. Эффективный крутящий момент двигателя $M_к = p_e i V_h/(\pi\tau)$, Н · м, прямо пропорционален p_e и связан с эффективной мощностью соотношением $N_e = M_к n/9\,550$, кВт.

Совокупные потери в двигателе оцениваются *эффективным КПД*, показывающим, какая доля теплоты, введенной с топливом, преобразуется в эффективную работу, т. е. $\eta_e = L_e/Q_т = \eta_i\eta_м$, а также *удельным эффективным расходом топлива* $g_e = G_{т.ц}/L_e = 1/(H_u\eta_e)$. При оценке экономичности ДВС для g_e используется размерность г/(кВт · ч), которая определяет массу топлива в граммах, необходимую для получения 1 кВт · ч работы. Следовательно, можно записать $g_e = 3\,600/(H_u\eta_e)$. При этом если заданы часовой расход топлива $G_т$, кг/ч, и эффективная мощность N_e, кВт, то $g_e = (G_т/N_e) \cdot 10^3$.

Индикаторные показатели двигателя, характеризующие эффективность преобразования теплоты $Q_т$, введенной с топливом, в индикаторную работу, и эффективные показатели связаны между собой значением механического КПД:

$$\eta_м = \frac{L_e}{L_i} = \frac{N_e}{N_i} = \frac{p_e}{p_i} = \frac{\eta_e}{\eta_i} = \frac{g_i}{g_e}.$$

Характерные значения индикаторных и эффективных показателей современных автотракторных двигателей на номинальном режиме работы приведены в табл. 1.1.

Необходимо отметить, что рабочий цикл дизеля без наддува на 15 ... 20 % экономичней рабочего цикла двигателя с искровым зажиганием, но уступает ему 20 ... 25 % в энергетических показателях.

Лучшая экономичность дизеля на номинальном режиме связана в основном с более высокими, чем в ДсИЗ, значениями степени сжатия ε и с его работой на бедных смесях при $\alpha > 1$. Это предопределяет относительно меньшие потери теплоты с отработавшими газами вследствие их более низкой температуры и меньшей теплоемкости, а также малые потери теплоты вследствие неполного сгорания топлива.

Таблица 1.1

Индикаторные и эффективные показатели автомобильных двигателей

Параметр двигателя	Двигатель с искровым зажиганием	Дизель без наддува
p_i, МПа	0,9 ... 1,2	0,90 ... 1,05
η_i	0,36 ... 0,45	0,45 ... 0,50
g_i, г/(кВт · ч)	180 ... 225	170 ... 188
$\eta_м$	0,80 ... 0,90	0,75 ... 0,78
p_e, МПа	0,85 ... 1,05	0,65 ... 0,80
η_e	0,28 ... 0,35	0,36 ... 0,39
g_e, г/(кВт · ч)	225 ... 300	215 ... 235

В автомобильных вариантах двигателей разница в эксплуатационной экономичности дизелей и ДсИЗ еще выше и может достигать 40 ... 45 %. Это связано с особенностями работы двигателей на автомобиле: большую часть периода их эксплуатации составляют частичные нагрузки. Для дизеля как для двигателя с качественным регулированием это приводит к дальнейшему более глубокому обеднению смеси, вплоть до значения $\alpha = 5$.

1.5. Литровая мощность и методы форсирования двигателей

Литровой мощностью называется номинальная (паспортная) эффективная мощность, снимаемая с единицы рабочего объема двигателя, кВт/л:

$$N_л = \frac{N_{e\,ном}}{iV_h} = \frac{p_{e\,ном} n_{ном}}{30\tau}.$$

При одинаковой номинальной мощности чем выше литровая мощность, тем меньше рабочий объем, а следовательно, меньше габаритные размеры и масса двигателя.

Комплекс технических мероприятий, способствующих повышению литровой мощности, называется *форсированием двигателя*. Двигатели, имеющие высокие значения $N_л$, называют *форсированными*.

Основные пути форсирования двигателей следуют из формального определения литровой мощности. Она увеличивается с ростом номинальной частоты вращения ($n_{ном}$), среднего эффективного давления (p_e) или при переходе от четырехтактного к двухтактному рабочему циклу ($\tau = 2$).

Увеличение литровой мощности посредством повышения номинальной частоты вращения широко используется в двигателях с искровым зажиганием (в современных моделях она достигает 6 500 мин$^{-1}$ и выше).

Номинальная частота вращения дизелей грузовых автомобилей, как правило, не превышает 2 600 мин$^{-1}$, поэтому литровая мощность дизелей без наддува составляет от 12 до 15 кВт/л, что существенно меньше аналогичного показателя двигателей с искровым зажиганием, равного 20...70 кВт/л.

В настоящее время в ряде конструкций дизелей трудности форсирования их по частоте вращения преодолеваются. Для легковых автомобилей производится все больше *дизелей* с наддувом и с номинальной частотой вращения $n_{ном}$ = 4 500... 5 500 мин$^{-1}$ и литровой мощностью $N_л$ = 30 кВт/л и более.

Следует помнить, что с ростом $n_{ном}$ увеличиваются потери на трение, поэтому растет удельный эффективный расход топлива и снижается срок службы двигателя вследствие износа его деталей.

При переходе с четырехтактного ($\tau = 4$) на двухтактный ($\tau = 2$) рабочий цикл литровая мощность формально должна увеличиваться в два раза. В действительности же она увеличивается всего лишь в 1,5 — 1,7 раза, что является следствием использования части хода поршня на организацию процессов газообмена, снижения качества очистки и наполнения цилиндров, а также дополнительных затрат энергии на привод продувочного насоса. Более высокая $N_л$ — это существенное достоинство двухтактных двигателей. Однако недоиспользование в них части рабочего объема цилиндра для получения индикаторной работы и худшие условия газообмена приводят к тому, что двухтактные двигатели имеют заметно более низкие удельные экономико-энергетические показатели, чем аналогичные четырехтактные двигатели. К недостаткам двухтактных ДВС следует отнести также сравнительно высокую тепловую напряженность элементов цилиндропоршневой группы вследствие большего теплоподвода к ним из-за вдвое более частого следования процессов сгорания.

Особое место в ряду мероприятий, направленных на повышение $N_л$, занимает форсирование двигателей по среднему эффективному давлению.

На практике существенное увеличение p_e достигается лишь за счет ввода в рабочий цикл большего количества теплоты с

топливом. Необходимая для этого подача в цилиндр дополнительного топлива требует для его полного сжигания увеличения и количества окислителя — кислорода с воздухом. На практике это реализуется повышением массы свежего заряда посредством подачи его в цилиндр двигателя под давлением обычно с помощью нагнетателя. Этот способ называется *наддувом двигателя*. При этом p_e возрастает практически пропорционально увеличению плотности подаваемого в цилиндры свежего заряда.

На рис. 1.4, *а* показана схема двигателя с наддувом и механическим приводом компрессора от коленчатого вала. Здесь привод компрессора *1* осуществляется через повышающий редуктор *2* от коленчатого вала *3*. Одним из недостатков такой системы наддува является снижение экономичности двигателя, обусловленное необходимостью затрат энергии на привод компрессора.

Наибольшее распространение в практике современного двигателестроения получил газотурбинный наддув, схема которого приведена на рис. 1.4, *б*. Здесь для привода центробежного компрессора *1* используется энергия отработавших газов, срабатываемая в газовой турбине *4*, которые конструктивно объединены в единый агрегат, называемый *турбокомпрессором* (ТКР).

Поскольку при газотурбинном наддуве отсутствует механическая связь агрегата наддува с коленчатым валом, применение ТКР может несколько ухудшить приемистость двигателя. Это определяется некоторой инерционностью ротора ТКР, а также уменьшением энергии отработавших газов при малых нагрузках, вследствие чего, особенно в начале разгона, не обеспечивается подача в цилиндр требуемого количества свежего заряда.

Для преодоления этих недостатков нередко возникает необходимость использования системы комбинированного наддува (рис. 1.4, *в*), которая обычно представляет собой определенные комбинации по одновременному использованию приводного нагнетателя и турбокомпрессоров.

По создаваемому на входе в цилиндр дизеля давлению $p_к$ (или степени повышения давления $\pi_к = p_к/p_0$) различают наддув *низкий* ($\pi_к < 1{,}5$), *средний* ($\pi_к = 1{,}5 \ldots 2{,}0$) и *высокий* ($\pi_к > 2{,}0$). При этом эффективная мощность двигателя увеличивается соответственно на 20...30, 40...50 и более 50 %.

При динамическом наддуве для повышения p_e используются колебательные явления в системах газообмена двигателя, являющиеся результатом цикличности следования этих процессов в его цилиндрах. Если, например, задать впускному тракту такие конструктивные параметры (в основном длину и площадь проходного сечения), при которых перед закрытием впускного клапана около него будет волна давления, то масса поступающего

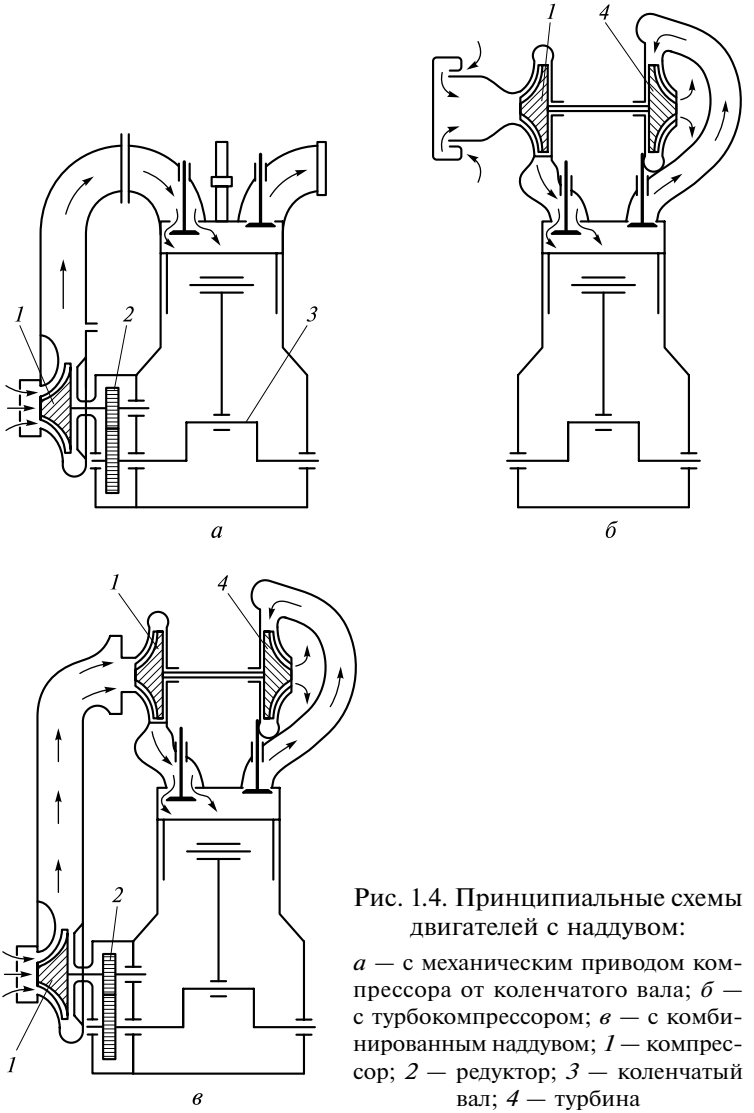


Рис. 1.4. Принципиальные схемы двигателей с наддувом:

а — с механическим приводом компрессора от коленчатого вала; *б* — с турбокомпрессором; *в* — с комбинированным наддувом; *1* — компрессор; *2* — редуктор; *3* — коленчатый вал; *4* — турбина

в цилиндр заряда увеличится. Также и выпускной трубопровод можно «настроить» таким образом, чтобы в конце выпуска вблизи выпускного клапана была волна разрежения. В результате этого улучшится очистка цилиндров и в них поступит большее количество свежего заряда.

При правильном выборе геометрических размеров систем газообмена в отдельных случаях с помощью динамического

наддува можно увеличить эффективную мощность двигателя на 5...10 %.

При использовании наддува увеличиваются механическая и тепловая напряженности элементов, формирующих камеру сгорания, что является одним из основных факторов, ограничивающих возможное увеличение плотности свежего заряда, поступающего в цилиндр. Следовательно, приходится применять более дорогостоящие жаропрочные материалы, усиливать охлаждение камеры сгорания и использовать дорогое масло с более высокой температурой коксования.

Применение наддува в двигателях с искровым зажиганием требует принятия специальных мер по предотвращению нарушения процесса сгорания топлива, называемого *детонацией* (см. подразд. 2.1.4). В частности, к таким мерам относится снижение степени сжатия на 1—2 единицы. Это обстоятельство, а также бóльшая по сравнению с дизелями тепловая напряженность лопаток турбины из-за более высокой температуры отработавших газов существенно осложняют использование наддува в двигателях данного типа. Тем не менее использование наддува в ДсИЗ расширяется.

1.6. Параметры напряженности, массогабаритные и экологические

Большое значение для оценки надежности и долговечности ДВС имеют параметры, характеризующие тепловую, механическую и динамическую напряженности его конструкции.

Одним из основных таких параметров является *средняя скорость поршня* $c_п = Sn/30$, где S — ход поршня, м; n — частота вращения коленчатого вала, 1/мин. Этот параметр характеризует механическую напряженность элементов конструкции двигателя от действия инерционных сил, пропорциональных значению $c_п$, а также косвенно отражает износостойкость основных сопряженных подвижных его элементов.

Параметром, определяющим комплексную напряженность (тепловую и механическую), является *поршневая мощность* $N_п = N_{e\,ном}/(iF_п)$, представляющая собой эффективную мощность, приходящуюся на единицу площади всех поршней. Этот параметр тесно связан с литровой мощностью двигателя, так как с учетом того что $iF_п = iV_h/S$, можно записать $N_п = N_л S$. После подстановки в эту зависимость выражения, определяющего $N_л$, получим $N_п = p_e c_п/\tau$.

В группу массогабаритных параметров входят *удельная масса*, представляющая собой массу сухого двигателя $M_{дв}$, отнесенную к

Таблица 1.2

Параметры массогабаритные, тепловой, механической и динамической напряженностей автомобильных двигателей

Тип ДВС	Параметры ДВС			
	$c_п$, м/с	$N_п$, кВт/дм^2	$g_л$, кг/л	g_N, кг/кВт
С искровым зажиганием	8 ... 16	22 ... 41	50 ... 120	1,4 ... 7
Дизель (без наддува)	6 ... 12	11 ... 19	30 ... 150	2,8 ... 10

его номинальной эффективной мощности $g_N = M_{дв}/N_{e\,ном}$, а также *литровая масса* $g_л = M_{дв}/(iV_h)$. Эти параметры связаны между собой через литровую мощность: $g_N = g_л/N_л$.

При одинаковом рабочем объеме iV_h литровая масса у дизелей больше, чем у ДсИЗ, в основном из-за большей массы элементов конструкции, что является следствием их более высокой тепловой, механической и динамической напряженностей. Так как дизели без наддува, как правило, имеют меньшую литровую мощность, для них характерны и бóльшие, чем для ДсИЗ, значения удельной массы (табл. 1.2).

Для дизелей с наддувом рассмотренные показатели в значительной мере зависят от $\pi_к$ и могут быть ориентировочно оценены для $1{,}5 < \pi_к < 2{,}5$ по следующим эмпирическим зависимостям: $g_{л(н)} \approx g_л/(\pi_к - 0{,}5)$, $g_{N(н)} \approx g_N/(\pi_к - 0{,}5)$, где индексом «н» обозначены модификации двигателей с наддувом.

Особое положение занимают *экологические показатели* ДВС, характеризующие наличие в отработавших газах токсических компонентов (оксида углерода CO, углеводородов CH, оксидов азота NO_x и частиц, включая сажу), а также излучение звуковой энергии (шума) в окружающее пространство. Если уровень экономико-энергетических и массогабаритных параметров определяется в основном техническими, экономическими, а часто и конъюнктурными соображениями, то экологические показатели ДВС жестко регламентируются соответствующими государственными и международными стандартами и правилами (см. подразд. 3.2).

1.7. Характеристики и эксплуатационные режимы работы двигателей

Транспортные двигатели эксплуатируются в условиях, требующих изменения в широких пределах скоростного и нагрузочного режимов работы. Для оценки эффективности функционирова-

ния ДВС при их работе на различных режимах и при различных значениях регулировочных параметров служат характеристики двигателя.

Характеристикой ДВС называется зависимость (как правило, графическая) показателей двигателя от режима работы или от параметров, связанных с регулировкой его основных систем.

Режим работы двигателя определяется сочетанием нагрузки $p_e(N_e)$ и частоты вращения коленчатого вала n.

Характеристики, представляющие собой зависимость показателей работы двигателей от частоты вращения при неизменном положении органа управления (дроссельной заслонки — для ДсИЗ, рычага управления — для дизеля), называются *скоростными*. Характеристика, полученная при положении органа управления, соответствующем максимальной подаче топлива или горючей смеси, называется *внешней скоростной характеристикой* (ВСХ). Эта характеристика, позволяющая определить предельные мощностные параметры двигателя и оценить его экономичность при полных нагрузках, является паспортной для большинства транспортных двигателей. По ней устанавливаются параметры двигателя на режимах номинальной мощности ($N_{e\,\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$) и максимального крутящего момента ($M_{\text{к max}}$, n_M), которые указываются заводом-изготовителем.

Характеристика, полученная при работе двигателя с любым постоянным промежуточным положением органа управления, называется *частичной скоростной характеристикой*.

Нагрузочной характеристикой называется зависимость показателей двигателя от p_e ($M_{\text{к}}$ или N_e) для фиксированной частоты вращения коленчатого вала. По этой характеристике определяется предельная для данной частоты вращения мощность, а также оценивается экономичность работы двигателя при различных нагрузках.

Для поршневых ДВС широко используются *регулировочные характеристики*, представляющие собой зависимости показателей двигателя на определенном режиме его работы от регулируемого параметра (например, от коэффициента избытка воздуха, угла опережения зажигания, угла опережения впрыскивания топлива и т.д.). Данные характеристики используются для определения оптимальных параметров работы систем топливоподачи и зажигания.

На рис. 1.5 схематически показано поле нагрузочных и скоростных режимов работы автомобильного двигателя.

Здесь выше оси абсцисс расположена *область активных режимов* работы двигателя (*A*), на которых его работа положительная. Сверху эта область ограничена кривой максимального крутящего момента по внешней скоростной характеристике *1* в диапазоне

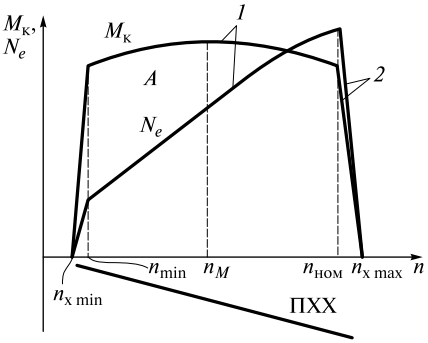


Рис. 1.5. Поле нагрузочных и скоростных режимов работы автомобильного двигателя:

1 — внешняя скоростная характеристика; *2* — регуляторная ветвь

частот вращения от n_{min} до $n_{ном}$, справа — *регуляторной ветвью* (для дизелей и ДсИЗ грузовых автомобилей), или ветвью снижения крутящего момента *2* при частоте вращения выше номинальной ($n_{ном}$), слева — минимальной устойчивой частотой вращения вала при данной нагрузке (от n_{min} до $n_{x\,min}$).

Точки, лежащие на оси абсцисс, соответствуют режимам холостого хода (ХХ): начиная от минимальной частоты вращения вала на холостом ходу $n_{x\,min}$ и заканчивая так называемой разносной частотой вращения холостого хода или максимальной частотой вращения при работе с регулятором $n_{x\,max}$.

Ниже линии абсцисс расположена *область пассивных режимов* работы двигателя. Эта зона, ограниченная снизу кривой момента, необходимого для проворачивания неработающего двигателя, соответствует работе двигателя в режиме выбега при переключении передач или на принудительном холостом ходу (ПХХ), т. е. при торможении автомобиля двигателем.

В реальной эксплуатации многие транспортные установки работают значительное время в условиях неустановившихся (переходных) режимов работы, т. е. когда показатели и тепловое состояние двигателя изменяются во времени. Например, при разгоне и торможении транспортного средства двигателем, при изменении нагрузки и частоты вращения и т. д. Причем доля переходных режимов может быть меньшей или большей в зависимости от технологического цикла и условий эксплуатации.

В силу особенностей рабочих процессов двигателя и отдельных его систем показатели на неустановившихся режимах могут отличаться от показателей, полученных на установившихся режимах.

Для каждой конкретной категории транспортных средств, в которой используется данный двигатель, можно выделить совокупность наиболее характерных режимов его работы. Так, например, для ДВС, используемых на автомобилях для городских перевозок, характерны относительно большие периоды работы на режимах

разгона, торможения двигателем, холостого хода и частичных нагрузок. В то же время двигатели автомобилей, предназначенных для междугородных перевозок, бóльшую часть периода эксплуатации работают на установившихся режимах, близких к режиму внешней скоростной характеристики.

1.8. Рабочие тела и топлива автомобильных двигателей

1.8.1. Рабочие тела в ДВС

Для обеспечения функционирования разнородных компонентов ДВС в качестве **рабочих тел** используют:

• *воздух*, в составе которого имеется кислород, применяемый в качестве *окислителя* при горении топлива, а также в качестве холодного теплоносителя для охлаждения двигателя. В первом случае важна степень очистки воздуха от механических примесей, влияющая на износ цилиндра и поршневой группы, и в обоих случаях важны его температура и давление;

• *топливо*, химическая энергия которого при горении преобразуется в теплоту, а затем в механическую работу;

• *масло*, служащее в системе смазывания для снижения механических потерь, уменьшения износов и охлаждения. Также масло используется в качестве рабочего тела в гидромуфтах привода вентиляторов, гидравлических толкателях, гидрокомпенсаторах, сервомоторах систем регулирования, гидравлических устройствах изменения фаз газораспределения, а в форсированных двигателях — и для охлаждения поршней. Масло состоит из значительного числа компонентов, распределенных в базовой основе, каждый из которых выполняет определенную функцию;

• *охлаждающую жидкость*, применяемую в системе охлаждения в качестве теплоносителя для отвода теплоты от нагретых элементов ДВС. В настоящее время в качестве охлаждающей жидкости используются антифризы (тосолы) — смеси воды с веществами, задающими их определенные теплофизические и эксплуатационные свойства, которые обеспечивают работу двигателя в условиях низких температур.

В двигателе изначально для формирования рабочего тела, в котором происходят физико-химические изменения и превращения, используются воздух и топливо. В цилиндр ДВС поступает *свежий заряд*, представляющий собой воздух (в дизеле) или топливовоздушную смесь (в ДсИЗ), который затем смешивается

с оставшимися в камере сгорания остаточными газами, образуя *рабочую смесь*. В процессе сгорания рабочая смесь превращается в продукты сгорания — *отработавшие газы*.

1.8.2. Состав и свойства топлив для поршневых ДВС

Основными жидкими топливами для ДВС являются бензины и дизельные топлива, получаемые в результате переработки нефти, представляющие собой смеси различных углеводородов. Для ДВС используются также сжатые и сжиженные природные газы, синтетические топлива (получаемые переработкой угля, сланцев), спирты, эфиры, водород и др. (см. подразд. 9.1).

В жизненном цикле ДВС до 70 % затрат приходится на топливо. Недостатком поршневых ДВС является то, что их показатели существенным образом зависят от энергетических (потребительских) и экологических свойств топлива, к которым предъявляются следующие требования:

- высокая теплота сгорания;
- необходимый фракционный состав, термическая стабильность и моющие свойства;
- минимально допустимое содержание серы и других нежелательных веществ, механических примесей и воды;
- заданные уровни склонности к детонации (для бензина) и воспламеняемости (для дизельного топлива);
- качество смесеобразования и сгорания, обеспечивающие необходимую скорость сгорания на всех режимах работы ДВС, включая неустановившиеся, и пуск при низких температурах;
- полнота сгорания и минимально возможное образование токсичных продуктов сгорания, сажи, нагара и коррозионно-агрессивных продуктов;
- стабильность свойств при хранении и транспортировке;
- пожарная и токсикологическая безопасность;
- достаточный ресурс и возможность обеспечения массового производства при приемлемой стоимости.

Свойства топлив подразделяются на *физико-химические*, характеризующие их состав и состояние (плотность, фракционный и химический составы, поверхностное натяжение, вязкость), и *эксплуатационные* (испаряемость, воспламеняемость, антидетонационные, пусковые и низкотемпературные свойства), определяющие требуемые энергетические, экономические и экологические показатели, а также надежность работы ДВС.

Горение топлива представляет собой экзотермические реакции, т.е. проходящие с выделением теплоты. *Высшая теплота сгорания топлива* ($H_в$) определяет полный тепловой эффект ре-

акций с учетом конденсации водяных паров, образующихся при сгорании. В поршневых ДВС продукты сгорания не охлаждаются до температуры, при которой происходит конденсация водяного пара, поэтому в расчетах ДВС используют *низшую теплоту сгорания* (H_u).

В табл. 1.3 представлены показатели, характеризующие свойства некоторых топлив.

Бензины для автомобильных ДВС представляют собой смеси углеводородов, выкипающих в диапазоне температур 40 ... 200 °С. В Российской Федерации производятся следующие марки бензинов: АИ-92, АИ-95, АИ-98, а также бензины с улучшенными экологическими свойствами. Цифры в обозначении марки бензина характеризуют его антидетонационные свойства.

Октановое число (ОЧ) характеризует способность топлива противостоять детонации (см. подразд. 2.1.4): чем оно выше, тем большую степень сжатия можно реализовать, а значит, достичь более высокого КПД. Численно ОЧ бензина равно процентному содержанию изооктана (ОЧ = 100) в его смеси с нормальным гептаном (ОЧ = 0), которая имеет такую же детонационную стойкость, как и испытуемый бензин.

Октановое число оценивается по моторному методу в единицах ОЧМ, а по исследовательскому методу в единицах ОЧИ. ОЧМ характеризует детонационную стойкость бензина при эксплуатации автомобиля в условиях повышенного теплового режима, а ОЧИ — при работе в условиях городской езды. ОЧИ больше ОЧМ на 8 ... 12 единиц.

ОЧ бензина повышают добавкой в него антидетонационных присадок: металлокарбонатов, алкилгалогенидов, низкокипящих высокооктановых углеводородов (бутановой, изобутановой фракций), а также кислородосодержащих веществ (метилового спирта, метил-трет-бутилового эфира — МТБЭ) и т. д. В РФ запрещено использование добавок на основе свинца.

При увеличении степени сжатия (ε) и диаметра цилиндра (D) необходимо использовать топливо с бóльшим ОЧ.

Испаряемость бензинов определяется их фракционным составом и давлением насыщенных паров. Испаряемость влияет как на пусковые свойства при низких температурах, так и на склонность к образованию паровых пробок при высоких температурах, а также на приемистость двигателя (см. подразд. 2.1.3).

Прокачиваемость, склонность к образованию отложений, коррозионная активность являются важными эксплуатационными свойствами бензинов.

Дизельные топлива для автомобильных и тракторных дизелей вырабатываются из гидроочищенных фракций прямой перегонки нефти.