

В.К.ВАХЛАМОВ, М.Г.ШАТРОВ, А.А.ЮРЧЕВСКИЙ

АВТОМОБИЛИ

ТЕОРИЯ И КОНСТРУКЦИЯ АВТОМОБИЛЯ И ДВИГАТЕЛЯ

УЧЕБНИК

Под редакцией д-ра техн. наук, профессора А. А. ЮРЧЕВСКОГО

Допущено

*Министерством образования Российской Федерации в качестве учебника
для студентов образовательных учреждений среднего профессионального
образования, обучающихся по специальностям «Техническое
обслуживание и ремонт автомобильного транспорта»,
«Механизация сельского хозяйства»*

7-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2012

УДК 629.113/.115(075.32)
ББК 39.33
В222

Рецензенты:

доцент Московского автомобильно-дорожного института,
канд. техн. наук *А. С. Паршин*;
профессор кафедры «Автомобили» МГТУ «МАМИ»
В. В. Селифонов

Вахламов В. К.

В222 Автомобили : Теория и конструкция автомобиля и двигателя : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В. К. Вахламов, М. Г. Шатров, А. А. Юрчевский ; под ред. А. А. Юрчевского. — 7-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 816 с.

ISBN 978-5-7695-8873-0

В учебнике изложены основные положения теории двигателя и автомобиля. Даны понятия о главных эксплуатационных свойствах и оценочных параметрах автотранспортных средств, методы расчетного и экспериментального определения их показателей. Описаны конструкции современных отечественных и зарубежных двигателей, механизмов, агрегатов, систем автомобилей и их электрооборудования. Показаны перспективные направления развития конструкций автомобилей, автопоездов и специализированного подвижного состава.

Учебник может быть использован при освоении профессионального модуля ПМ.01 «Техническое обслуживание и ремонт автотранспорта (МДК.01.01)» по специальности 190631 «Техническое обслуживание и ремонт автомобильного транспорта».

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования.

УДК 629.113/.115(075.32)
ББК 39.33

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

© Вахламов В. К., Шатров М. Г., Юрчевский А. А., 2003
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2005

ISBN 978-5-7695-8873-0

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2005

ВВЕДЕНИЕ

При подготовке специалистов по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей дисциплина «Автомобили» служит основой для изучения других предметов специального цикла. Целью курса «Автомобили» (теория и конструкция автомобиля и двигателя) является изучение рабочих процессов двигателей, эксплуатационных свойств автомобилей, а также особенностей их конструкции.

Основное назначение автомобиля — обеспечение перевозочного процесса с заданной эффективностью по экономичности, экологичности и безопасности. Двигатель внутреннего сгорания — основная энергетическая установка современного автомобиля, главной функцией которой является преобразование химической энергии топлива в механическую работу. Теория двигателя изучает рабочие процессы, происходящие в двигателе при преобразовании энергии топлива в работу с помощью специальных устройств и механизмов, составляющих конструкцию двигателя. К двигателю предъявляются требования по габаритам, массе и, естественно, по надежности и долговечности.

Современный автомобиль является сложной машиной, созданной трудом большого числа работников различных отраслей науки и техники многих стран. Первые автомобили с паровой силовой установкой, появившиеся в XVIII в., были тяжелыми и громоздкими. В 1860 г. французский инженер Этьен Ленуар изобрел первый двигатель внутреннего сгорания, работающий на светильном газе. В 1870 г. Э.Ланген и Н.Отто (Германия) построили четырехтактные газовые двигатели с принудительным воспламенением смеси, а в 1897 г. немецкий инженер Р.Дизель создал первый стационарный двигатель с воспламенением рабочей смеси от сжатия — дизель. В 1883 г. появился автомобиль с двигателем внутреннего сгорания, построенный К.Бенцем, в 1888 г. — первый мотоцикл Г.Даймлера.

Развитие автомобильной техники сопровождалось совершенствованием научных дисциплин, связанных с изучением эксплуатационных свойств автомобиля. В 1906 г. профессор В.И.Гриневский разработал метод теплового расчета двигателя. В дальнейшем этот метод был дополнен профессором Е.К.Мазингом, академиком Б.С.Стечкиным и другими учеными. Много сделано в области совершенствования автомобильных дизелей членом-кор-

респондентом АН СССР Н. Р. Брилингом, Г. Г. Калишем, М. С. Хо-вахом и др. Эксплуатационные режимы работы двигателя исследовали И. М. Ленин, Н. Х. Дьяченко, Д. А. Рубец. Проблемы виброакустики двигателей и экологии транспортных средств исследовались членом-корреспондентом РАН В. Н. Луканиным.

Теория автомобиля изучает его эксплуатационные свойства, обеспечивающие перевозку грузов и пассажиров с максимальной производительностью, безопасностью и комфортабельностью при минимальных трудовых и материальных затратах. Теоретический анализ эксплуатационных свойств позволяет выяснить предельные (потенциальные) возможности автомобиля и реализовать в эксплуатационных условиях свойства, которыми обладает рассматриваемая конструкция автомобиля.

Теория автомобиля формировалась и развивалась в результате деятельности научных организаций и ученых многих стран. В нашей стране для развития автомобильной науки в 1918 г. была создана автомобильная лаборатория, ставшая научным центром и сыгравшая большую роль в развитии автомобильной промышленности. В 1921 г. на базе этой лаборатории был организован Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ), который стал базой для большинства новых, научно обоснованных разработок двигателей и автомобилей.

Исследования знаменитого русского ученого Н. Е. Жуковского и академика Е. А. Чудакова стали базовыми для анализа эксплуатационных свойств автомобилей и разработки методов экспериментального исследования поведения автомобиля в различных дорожных условиях. В последующих работах («Динамическое и экономическое исследование автомобиля», 1928, «Тяговый расчет автомобиля», 1947 и др.) Е. А. Чудаков определил цели и задачи теории автомобиля, разработал научный метод теоретического и экспериментального исследования эксплуатационных свойств, которые являются базовыми в современном курсе «Теория автомобиля».

Основоположником отечественной автомобильной школы является академик Е. А. Чудаков, которому принадлежат более двухсот работ по различным отраслям автомобильной науки. Профессор Г. В. Зимелев исследовал тяговую динамичность автомобиля и предложил аналитический метод расчета ее показателей. Я. М. Певзнер и А. С. Литвинов разработали теорию движения автомобиля на повороте. Б. С. Фалькевич и Н. К. Куликов исследовали топливную экономичность автомобиля. В области тормозной динамики успешно работали Н. А. Бухарин и А. Б. Гредескул, а вопросы плавности хода обобщены в трудах Р. В. Ротенберга. Большая работа по исследованию эксплуатационных свойств автомобильного поезда проделана Н. А. Яковлевым и Я. Х. Закиным.

Решающим условием успешного развития любой теории является ее неразрывная связь с практикой. Над конкретизацией основных положений теории и приложением их к решению реальных задач эксплуатации автомобиля работали Г. В. Крамаренко, Л. Л. Афанасьев, Д. П. Великанов и др.

Идеи Е. А. Чудакова, Г. В. Зимелева и Н. А. Яковлева послужили основой для выпуска в 1932 — 1939 гг. учебников и учебных пособий, в которых кроме методов анализа эксплуатационных свойств автомобиля рассмотрены критерии их количественной оценки. Повышение эффективности транспортной работы связано с требованием увеличения скоростей движения, т.е. сокращением времени перевозок, что невозможно без соблюдения условий безопасности, которая в свою очередь зависит от такого эксплуатационного свойства, как тормозная динамичность.

Результаты исследования тормозной динамичности, начатого Н. А. Бухариным в 1946 г., были дополнены А. Б. Гредескулом, М. А. Петровым и А. А. Ревиным. Совершенствование конструкции устройств управления режимом движения автомобиля с помощью компьютера, получающего информацию от устройств электронного технического зрения под контролем искусственного интеллекта, начало которому в Российской Федерации положено А. А. Юрчевским, открыло путь для реализации эффективного и безопасного автоматизированного транспортного процесса. Повышение скоростей движения автомобилей привело к необходимости решения проблем устойчивости и управляемости. В труде Я. М. Певзнера «Устойчивость автомобиля» (1947 г.) подробно исследованы особенности криволинейного движения автомобиля с учетом поперечной эластичности шин. Этот сложный вопрос в дальнейшем изучался В. А. Иларионовым, А. С. Литвиновым и Я. К. Фаробиным. Колебания и плавность хода автомобиля исследованы Р. В. Ротенбергом, И. Г. Пархиловским, Р. А. Акоюном, Н. Н. Яценко. Ими разработаны методы испытаний автомобиля на плавность хода, предложены оценочные показатели. Я. Х. Закин, Д. А. Антонов, Г. А. Смирнов, В. Ф. Платонов исследовали устойчивость автопоезда, разработали разделы теории движения многоосных автомобилей. В трудах Л. Л. Афанасьева и Г. В. Крамаренко показаны пути применения теоретических положений к решению эксплуатационных задач для повышения производительности подвижного состава и снижения себестоимости перевозок.

Соответствие конструкции требованиям эксплуатации является обязательным условием успешного развития автомобильной техники. Над совершенствованием конструкции автомобилей работают большие коллективы научных, учебных институтов и конструкторских бюро автомобильных заводов, возглавляемые ведущими специалистами отрасли. Ряд моделей автомобилей Горьковского автомобильного завода (ГАЗ) создан под руководством А. А. Лип-

гарта. Проектированием легковых автомобилей на Московском автомобильном заводе им. И. А. Лихачева (ЗИЛ) руководил А. Н. Островцев, а грузовых автомобилей А. М. Кригер. В. В. Осепчуговым и М. С. Высоцким проведена большая работа по совершенствованию конструкции и проектированию новых моделей автомобилей большой грузоподъемности.

Научно-исследовательские институты автомобильного транспорта изучают характерные условия эксплуатации автомобилей в стране, обобщают опыт передовых автотранспортных предприятий и водителей, разрабатывают требования к вновь создаваемым и модернизируемым транспортным средствам, работают над конкретизацией основных положений теории автомобиля и приложением их к решению реальных задач эксплуатации. Это дает возможность предъявить научно обоснованные требования ко вновь создаваемым или модернизируемым моделям автомобилей.

С расширением автомобильного парка увеличиваются материальные и человеческие потери, вызываемые дорожно-транспортными происшествиями. Снижение аварий на автомобильном транспорте возможно лишь при внимательном изучении их причин наряду с улучшением безопасности автомобиля. В нашей стране основы научного анализа процесса возникновения и способов предотвращения дорожно-транспортных происшествий разработаны В. А. Иларионовым, внесшим большой вклад в развитие теории автомобиля. Материалы его трудов использованы в данном учебнике.

Во многих странах идет усиленная работа по обеспечению безопасности людей и сохранности грузов при авариях. Большую роль при этом играют автоматические устройства и системы, срабатывающие в опасных дорожно-транспортных ситуациях и берущие на себя функции управления автомобилем. Решению этих проблем посвящены ряд разделов международной научной программы «Эврика» и Европейской программы «Прометеус» (программа Европейского транспорта наивысшей эффективности и супернадежности).

РАЗДЕЛ I*

ТЕОРИЯ, ДИНАМИКА И КОНСТРУКЦИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Глава 1

КЛАССИФИКАЦИЯ, ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ ДВС

1.1. Классификация двигателей

Двигатель — энергетическая машина, преобразующая какую-либо энергию в механическую работу. Основным типом энергетической установки на транспорте является тепловой двигатель — сложная техническая система, преобразующая теплоту в механическую работу.

Для транспортных двигателей характерны: многорежимность, требующая поддержания высокой эффективности их функционирования при варьировании в широких пределах скоростного и нагрузочного режимов работы; необходимость сохранять работоспособность при изменении положения двигателя в пространстве; высокие требования к габаритным размерам и массе.

Тепловые двигатели классифицируют по следующим признакам: *по способу подвода теплоты к рабочему телу*, с помощью которого теплота преобразуется в механическую работу, — двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и двигатели с внешним подводом теплоты. В ДВС сжигание топлива, выделение теплоты и преобразование части ее в механическую работу происходит непосредственно в цилиндре двигателя. При этом для получения необходимого количества работы в двигателе автомобиля рабочее тело обновляется;

по конструкции расширительной машины, с помощью которой теплота, выделяющаяся в результате сгорания топлива, преобразуется в механическую работу, — *поршневые ДВС* с возвратно-поступательно движущимися поршнями; *роторно-поршневые ДВС* с вращающимися поршнями; *газотурбинные двигатели*; *реактивные двигатели*.

Вследствие трудностей обеспечения высокой экономичности роторно-поршневые, газотурбинные и реактивные двигатели не нашли широкого применения в наземной транспортной технике.

* В основу раздела положены материалы учебника-комплекса, разработанного коллективом кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» МАДИ (ГТУ) под руководством члена-корреспондента РАН В.Н.Лукинина.

Поршневые ДВС (в дальнейшем — двигатели) классифицируют следующим образом:

по способу воспламенения рабочего тела — двигатели с искровым (принудительным) зажиганием и с воспламенением от сжатия (дизели);

по виду используемого топлива — двигатели, в которых используют жидкое горючее (бензин, дизельное топливо) и газовое;

по способу смесеобразования — двигатели с внешним (вне цилиндра) и с внутренним (внутри цилиндра) смесеобразованием;

по виду регулирования мощности — двигатели с количественным и двигатели с качественным регулированием мощности. При количественном регулировании мощность изменяется дроссельной заслонкой за счет количества топливовоздушной смеси, поступающей в цилиндр, а при качественном — варьированием количества впрыскиваемого топлива при неизменном количестве воздуха;

по принципу организации рабочих процессов — двухтактные и четырехтактные ДВС. Такт — совокупность процессов, протекающих в цилиндре двигателя при перемещении поршня между *верхней и нижней мертвыми точками* (ВМТ и НМТ). В четырехтактном ДВС рабочий цикл совершается за два оборота коленчатого вала ($\tau = 4$), а в двухтактном — за один ($\tau = 2$). Необходимо отметить, что понятия «такт» и «процесс» не совпадают.

Двигателям с искровым зажиганием свойственно количественное регулирование мощности и внешнее смесеобразование. В них возможно использование бензина и газа. Бензиновые двигатели разделяют на две модификации — *двигатели с впрыскиванием топлива* через форсунку во впускную систему (обычно на впускной клапан или в цилиндр) и *карбюраторные* (топливовоздушная смесь, поступающая в цилиндры, подготавливается карбюратором).

Карбюраторные двигатели в настоящее время активно вытесняются двигателями с впрыскиванием топлива (рис. 1.1). Подача топлива в этих двигателях осуществляется по сигналу блока управления, сформированному по информации комплекса датчиков (расхода воздуха, частоты вращения коленчатого вала, положения дроссельной заслонки и т. д.).

Двигателям с воспламенением от сжатия (дизелям) свойственно качественное регулирование мощности и внутреннее смесеобразование.

Двигатель внутреннего сгорания состоит из механизмов и систем, имеющих следующее назначение:

кривошипно-шатунный механизм — преобразование индикаторной работы, получаемой в результате сгорания, в эффективную работу, отдаваемую потребителю;

газораспределительный механизм — наполнение цилиндров двигателя свежим зарядом и очистка их от отработавших газов;

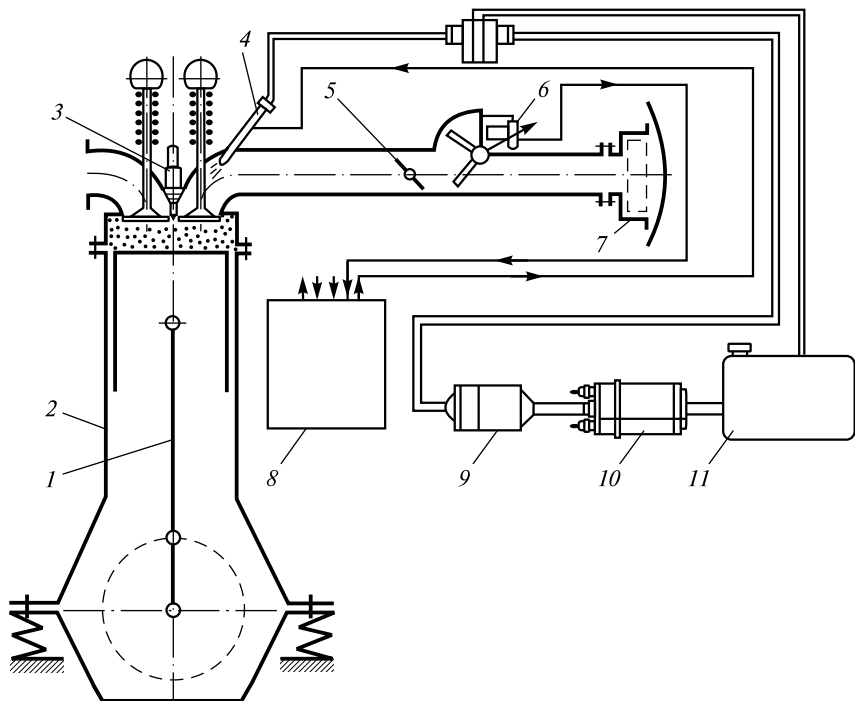


Рис. 1.1. Схема двигателя с впрыскиванием бензина во впускную систему: 1 — подвижные элементы кривошипно-шатунного механизма; 2 — неподвижные элементы кривошипно-шатунного механизма; 3 — свеча зажигания; 4 — форсунка; 5 — дроссельная заслонка; 6 — расходомер; 7 — воздухоочиститель; 8 — электронный блок управления; 9 — топливный фильтр; 10 — топливный насос; 11 — топливный бак

система питания топливом — подача топлива, организация смесеобразования;

смазочная система — обеспечение смазывания трущихся поверхностей подвижных деталей двигателя;

система охлаждения — обеспечение требуемого температурного режима работы двигателя;

система питания воздухом — очистка и подача воздуха в цилиндры двигателя и снижение шума впуска;

система наддува — организация форсирования двигателя;

система выпуска — глушение шума выпуска и нейтрализация отработавших газов;

система пуска — обеспечение надежного пуска двигателя в различных эксплуатационных условиях;

система зажигания — воспламенение рабочей смеси в двигателе с искровым зажиганием.

1.2. Рабочие процессы двигателя

Рабочий цикл двигателя формируется из взаимосвязанных *процессов*, которые зависят от особенностей его организации в соответствии с использованными принципами функционирования двигателя. Анализируют рабочий цикл по индикаторной диаграмме, которая представляет собой зависимость давления p в цилиндре двигателя от текущего надпоршневого объема V (рис. 1.2).

Рабочие процессы четырехтактного бензинового двигателя. В термодинамике данный цикл моделируется циклом Отто, в котором полагают, что в процессе при $V = \text{const}$ в ВМТ теплота подводится мгновенно.

Бензиновый двигатель — двигатель с принудительным искровым зажиганием, внешним смесеобразованием и количественным регулированием мощности. На большей части режимов мощность двигателя регулируется изменением количества подаваемой в цилиндры топливовоздушной смеси при мало меняющемся ее составе. В зависимости от режима работы двигателя *свежий заряд* (топливовоздушная смесь) может иметь различное относительное содержание топлива и воздуха. Состав топливовоздушной смеси оценивают *коэффициентом избытка воздуха* α — отношением количества воздуха G_B , содержащегося в топливовоздушной смеси, к его минимально необходимому количеству для полного сгорания топлива G_T ,

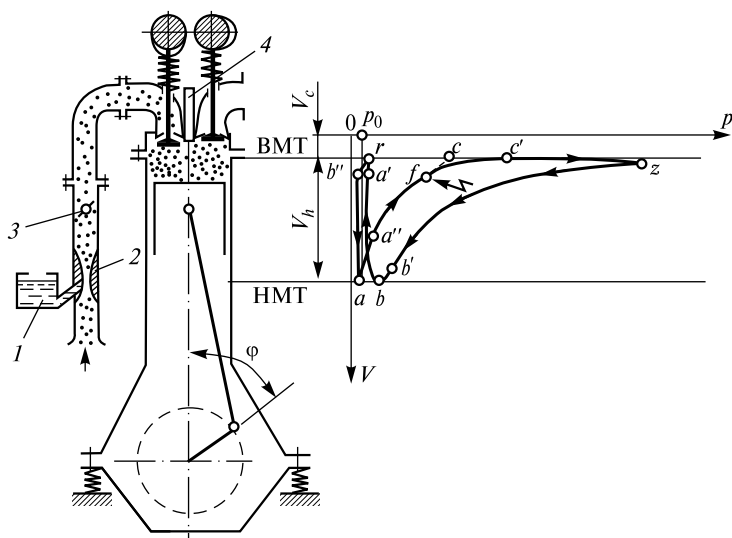


Рис. 1.2. Схема двигателя с искровым зажиганием и его индикаторная диаграмма:

1 — поплавковая камера; 2 — диффузор карбюратора; 3 — дроссельная заслонка; 4 — свеча зажигания

находящегося в смеси: $\alpha = G_b / (G_r l_0)$, где $l_0 = 14,9$ кг — количество воздуха, необходимое для полного сжигания 1 кг бензина. Если $\alpha = 1$, то смесь называется *стехиометрической*. При $\alpha < 1$ смесь называется *богатой* (топливом), а при $\alpha > 1$ — *бедной* (топливом).

Для бензиновых двигателей в зависимости от режима работы α изменяется в пределах 0,7... 1,3.

Рассмотрим процессы, формирующие индикаторную диаграмму четырехтактного двигателя с искровым зажиганием, описав последовательно такты рабочего цикла двигателя (на рис. 1.2 p_0 — атмосферное давление).

Такт впуска осуществляется при повороте кривошипа на угол от $\varphi = 0$ до $\varphi = 180^\circ$. Надпоршневое пространство при этом изменяется от объема камеры сгорания V_c (ВМТ) до полного объема цилиндра V_a (НМТ). Такт на индикаторной диаграмме представлен линией *ra*.

В начале такта в объеме камеры сгорания V_c находится часть продуктов сгорания от предыдущего цикла — *остаточные газы*. В результате их смешения со *свежим зарядом* в цилиндре двигателя образуется *рабочая смесь*. При движении поршня к НМТ закрывается выпускной клапан (в точке *b''*), создается разрежение в цилиндре и он заполняется свежим зарядом.

Давление рабочего тела p_a в точке *a* зависит от гидравлических потерь во впускном тракте. Эти потери уменьшаются при улучшении качества впускного трубопровода, уменьшении скорости движения свежего заряда во впускном тракте, а также при увеличении степени открытия дроссельной заслонки, которые зависят от скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя.

Температура рабочего тела T_a в точке *a* определяется интенсивностью теплообмена между свежим зарядом, поверхностями впускного трубопровода, по которому движется свежий заряд и стенками камеры сгорания, а также его смешиванием с остаточными газами. В карбюраторных двигателях для улучшения испарения бензина впускной трубопровод специально подогревают.

Такт сжатия происходит при повороте кривошипа на угол от $\varphi = 180^\circ$ (НМТ) до $\varphi = 360^\circ$ (ВМТ). На индикаторной диаграмме такту сжатия соответствует линия *ac*.

В конце такта сжатия (в точке *c*) расчетные параметры рабочего тела $p_c = p_a \epsilon^{n_1}$; $T_c = T_a \epsilon^{n_1 - 1}$ определяются их начальными значениями (p_a , T_a), а также степенью сжатия ϵ (n_1 — показатель адиабаты сжатия).

Степень сжатия называется отношением $\epsilon = V_a / V_c = (V_h + V_c) / V_c$, где V_h — рабочий объем двигателя. Для современных двигателей $\epsilon = 7,5 \dots 10$.

В действительном цикле закрытие впускного клапана происходит несколько позже НМТ (точка *a''*) в целях увеличения наполнения цилиндра свежим зарядом (дозарядка) за счет энергии его

движения. В момент, обозначенный на диаграмме буквой f , происходит искровой разряд в свече зажигания. В цилиндре начинается процесс сгорания топливовоздушной смеси, поэтому параметры рабочего тела будут увеличиваться. Угловой интервал (в градусах поворота коленчатого вала) от момента подачи искры до прихода поршня в ВМТ называется *углом опережения зажигания* $\varphi_{0,3}$.

Такт расширения происходит в процессе сгорания заранее подготовленной достаточно однородной рабочей смеси во время движения поршня от ВМТ ($\varphi = 360^\circ$) к НМТ ($\varphi = 540^\circ$). В начальный период такта сгорает основная масса топлива, а при расширении рабочего тела производится полезная работа. На индикаторной диаграмме это кривая $c'zb$.

При повороте кривошипа на угол $\varphi_z = 10 \dots 15^\circ$ после ВМТ давление в цилиндре максимально.

В действительном цикле до прихода поршня в НМТ в точке b' открывается выпускной клапан. Это несколько уменьшает работу расширения, но существенно улучшает очистку цилиндра от отработавших газов.

Такт выпуска осуществляется во время движения поршня от НМТ ($\varphi = 540^\circ$) к ВМТ ($\varphi = 720^\circ$), в ходе которого продукты

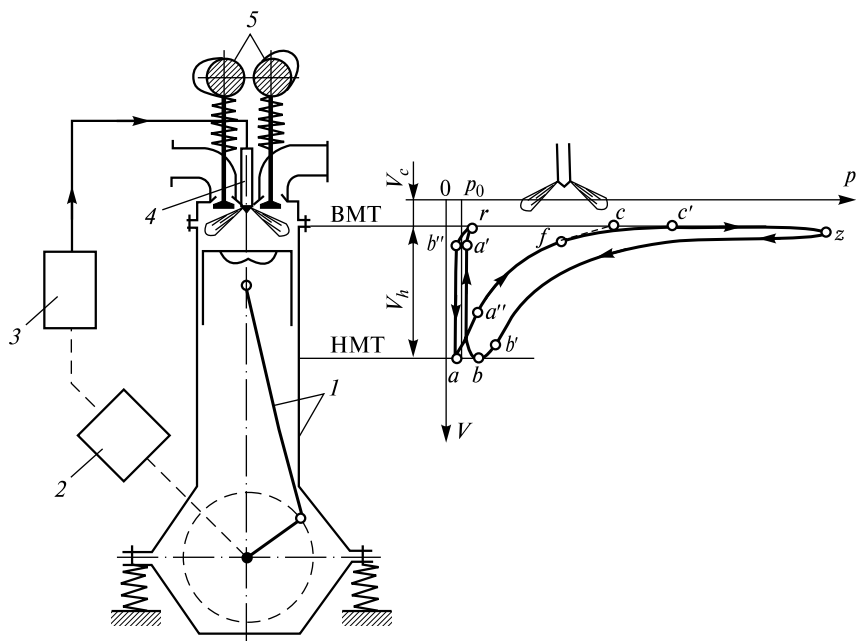


Рис. 1.3. Схема дизеля и его индикаторная диаграмма:

1 — кривошипно-шатунный механизм; 2 — редуктор; 3 — топливный насос высокого давления; 4 — форсунка; 5 — механизм газораспределения

сгорания выталкиваются из цилиндра при небольшом избыточном давлении $p_r = (1,05 \dots 1,2) p_0$. На индикаторной диаграмме данному такту соответствует кривая br .

В конце такта выпуска в точке a' , когда поршень еще не дошел до ВМТ, начинает открываться впускной клапан.

Рабочие процессы четырехтактного дизеля. В термодинамике данный цикл моделируется циклом Сабатэ — Тринклера, в котором полагают, что теплота подводится в процессах при $V = \text{const}$ в ВМТ и при $p = \text{const}$ после ВМТ.

Дизель — двигатель с воспламенением от сжатия, внутренним смесеобразованием и качественным регулированием мощности. Она регулируется путем впрыскивания различного количества топлива в неизменное количество воздушного заряда, что практически не влияет на общий объем топливовоздушной смеси, но резко изменяет ее состав (α от 1,3 до 5). В дизеле *свежий заряд* — воздух. Для полного сжигания 1 кг дизельного топлива требуется кислород, содержащийся в 14,5 кг воздуха. Чтобы обеспечить надежное самовоспламенение смеси, степень сжатия в дизелях принимается большей, чем в двигателях с искровым зажиганием: $\epsilon = 14 \dots 23$.

Проанализируем особенности протекания процессов, формирующих рабочий цикл дизеля (рис. 1.3), и сравним с характером протекания аналогичных процессов в двигателе с искровым зажиганием.

Такт впуска. Гидравлические потери во впускной системе дизеля меньше, чем в двигателе с искровым зажиганием, из-за отсутствия дроссельной заслонки. Они не меняются при изменении нагрузки на двигатель. Нет отвода теплоты от свежего заряда на доиспарение топлива. Поэтому давление в точке a в дизеле больше, чем в двигателе с искровым зажиганием.

Так как в дизеле степень сжатия больше, то к свежему заряду подмешивается относительно меньшее количество отработавших газов, температура которых меньше, чем у двигателя с искровым зажиганием. Поэтому температура T_a в дизеле несколько ниже.

Такт сжатия. Из-за большей степени сжатия параметры рабочего тела в точке c у дизеля выше, чем в двигателе с искровым зажиганием.

Топливо впрыскивается в камеру сгорания в конце такта сжатия. Угол поворота коленчатого вала от момента начала впрыскивания топлива (точка f) до прихода поршня в ВМТ, называется *углом опережения впрыскивания* $\varphi_{о.вп}$. Процесс сгорания начинается до ВМТ, а давление в цилиндре p'_c превышает давление сжатия p_c .

Такт расширения. В отличие от двигателя с искровым зажиганием в дизеле подготовка топливовоздушной смеси происходит за существенно меньший интервал времени. Значительная часть топлива впрыскивается в цилиндр непосредственно в процессе сгорания. Поэтому в дизеле при положении поршня около ВМТ сго-

рает меньшая доля топлива, чем в бензиновом двигателе. Часть подаваемого топлива сгорает после ВМТ. Более низкие значения T_z являются следствием бóльшего значения коэффициента избытка воздуха в дизеле.

Параметры рабочего тела в конце такта расширения в точке b ниже, чем в двигателе с искровым зажиганием, из-за более высокой степени сжатия и, следовательно, бóльшей степени расширения продуктов сгорания.

Такт выпуска. Параметры рабочего тела в точке r в дизеле также ниже, чем в двигателе с искровым зажиганием, что обусловлено более низкой температурой в конце такта расширения T_b .

1.3. Энергетический баланс и экономико-энергетические показатели двигателя

Теплота Q_T , которая вводится с топливом в цилиндр ДВС за цикл его работы, расходуется на совершение индикаторной работы цикла L_i и на тепловые потери $Q_{пот}$ (рис. 1.4):

$$Q_T = L_i + Q_{пот},$$

где $Q_T = q_{ц} H_u$ (здесь $q_{ц}$ — цикловая подача топлива; H_u — низшая теплота сгорания).

В состав $Q_{пот}$ входят потери теплоты в систему охлаждения $Q_{охл}$, с отработавшими газами $Q_{о.г}$ и от неполного сгорания топлива $Q_{н.с}$, когда $\alpha < 1$.

Индикаторная работа цикла L_i представляет собой работу, получаемую за такты расширения (положительная работа L_p) и сжатия (отрицательная работа $L_{сж}$):

$$L_i = L_p - |L_{сж}|.$$

На индикаторной диаграмме L_i соответствует площадь, ограниченная линиями расширения и сжатия. В свою очередь индикаторная работа расходуется на получение *эффективной (полезной) работы L_e* , отдаваемой потребителю, и на *механические (внутренние) потери L_M* :

$$L_i = L_e + L_M.$$

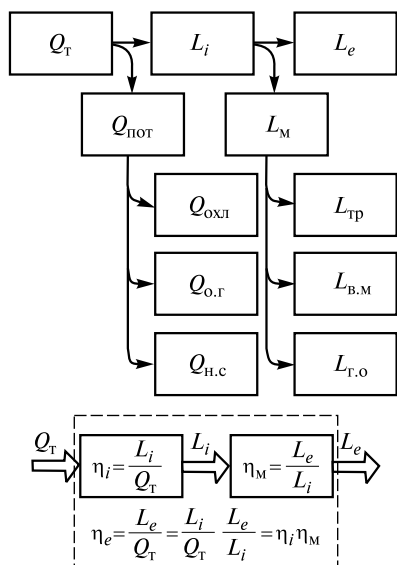


Рис. 1.4. Энергетический баланс двигателя

В состав L_M входят потери на трение $L_{тр}$, привод вспомогатель-

ных агрегатов и механизмов $L_{в.м}$ (жидкостный и масляный насосы, топливоподающая аппаратура дизелей и т.п.) и организацию процессов газообмена $L_{г.о}$. Последний вид потерь относят к данной группе условно для сравнения эффективности термодинамического и действительного циклов ДВС.

Уровень тепловых потерь в двигателе оценивают с помощью *индикаторного КПД*, показывающего долю теплоты, преобразованной в индикаторную работу, относительно всей теплоты, введенной в двигатель за цикл с топливом:

$$\eta_i = L_i/Q_T = (Q_T - Q_{пот})/Q_T = 1 - Q_{пот}/Q_T.$$

Для оценки работоспособности действительного цикла используют удельный показатель — *среднее индикаторное давление* p_i , представляющий собой индикаторную работу цикла, получаемую с единицы рабочего объема цилиндра двигателя $p_i = L_i/V_h$. Он позволяет сравнивать работоспособность двигателей различного рабочего объема.

Показатель, характеризующий получение индикаторной работы за единицу времени, называется *индикаторной мощностью* N_i .

$$N_i = L_i/t_{ц},$$

где $t_{ц} = (60/n)0,5\tau$ — время выполнения одного рабочего цикла двигателя; n — частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹; τ — коэффициент тактности ($\tau = 2$ для двухтактного и $\tau = 4$ для четырехтактного двигателей).

Так как $L_i = p_i V_h$, то для двигателя с числом цилиндров, равном i , индикаторная мощность, кВт, будет определяться по формуле

$$N_i = p_i n i V_h / (30\tau).$$

Индикаторный крутящий момент двигателя $M_i = p_i i V_h / (\pi\tau)$, следовательно, он прямо пропорционален p_i .

Экономичность двигателя оценивают с помощью *удельного индикаторного расхода топлива* g_i , который показывает, какое количество топлива в цикле расходует двигатель на производство единицы индикаторной работы: $g_i = g_{ц}/L_i$. Или, если задать часовой расход топлива G_T , кг/ч, и индикаторную мощность N_i , кВт, то $g_i = (G_T/N_i)10^3$, г/(кВт·ч).

Уровень механических потерь в ДВС оценивают с помощью *механического КПД* η_m , который характеризует долю эффективной работы L_e , преобразованной из индикаторной:

$$\eta_m = L_e/L_i = (L_i - L_m)/L_i = 1 - L_m/L_i.$$

Эффективные показатели определяют полезно используемую мощность и экономичность двигателя.

Совокупность всех потерь в двигателе оценивают *эффективным КПД*, который показывает долю теплоты, преобразованной в эффективную работу, относительно всей теплоты, введенной с топливом в цикл:

$$\eta_e = L_e / Q_T = L_i \eta_m / Q_T = \eta_i \eta_m.$$

Среднее эффективное давление $p_e = L_e / V_h$; *эффективная мощность* $N_e = p_e \pi i V_h / (30\tau)$; *эффективный крутящий момент двигателя* $M_k = p_e i V_h / (\pi\tau)$.

Удельный эффективный расход топлива позволяет оценить экономичность двигателя. Он показывает, какое количество топлива расходуется на производство единицы эффективной работы или какое количество топлива расходуется для получения 1 кВт эффективной мощности за 1 ч работы: $g_e = (G_T / N_e) 10^3$, г/(кВт·ч). Показатели η_e и g_e связаны между собой зависимостью $g_e = 3600 / (\eta_e H_u)$.

Связь одноименных индикаторных и эффективных показателей с помощью механического КПД имеет вид

$$\eta_m = L_e / L_i = N_e / N_i = p_e / p_i = g_i / g_e.$$

1.4. Методы форсирования двигателя

Мощность двигателя можно повышать экстенсивно, увеличивая рабочий объем цилиндра V_h или число цилиндров i , однако при этом возрастают габаритные размеры и масса двигателя. Мероприятия по интенсивному повышению мощности оценивают *литровой мощностью* $N_{л}$, которая представляет собой отношение номинальной эффективной мощности $N_{e\text{ном}}$ к рабочему объему двигателя: $N_{л} = N_{e\text{ном}} / (iV_h) = p_e n / (30\tau)$.

$N_{л}$ — мощность, получаемая с единицы рабочего объема. При заданной номинальной мощности бóльшая литровая мощность обеспечивает снижение рабочего объема и, следовательно, уменьшение габаритных размеров и массы двигателя.

Комплекс технических мероприятий, направленных на повышение литровой мощности, называют *форсированием двигателя*.

Из определения $N_{л}$ следует, что принципиально возможно форсировать ДВС тремя способами: увеличением номинальной частоты вращения $n_{\text{ном}}$ или среднего эффективного давления p_e , переходом с четырехтактного рабочего процесса на двухтактный.

Увеличение $N_{л}$ путем повышения *номинальной частоты вращения* $n_{\text{ном}}$ широко применяется в двигателях с искровым зажиганием. В дизелях такое повышение затруднено из-за сравнительно большой массы подвижных элементов кривошипно-шатунного меха-

низма, больших механических нагрузок, трудностей с организацией процессов смесеобразования и сгорания при малом времени, отводимом на их реализацию. Кроме того, при повышении частоты вращения возрастают внутренние потери и, следовательно, ухудшается экономичность двигателя.

Номинальная частота вращения современных двигателей с искровым зажиганием достигает 6500 мин^{-1} , дизелей грузовых автомобилей — 2600 мин^{-1} , а дизелей легковых автомобилей — 5500 мин^{-1} . Это предопределяет большую литровую мощность двигателей с искровым зажиганием (в 2...3 раза по сравнению с дизелями без наддува).

Теоретически *переход с четырехтактного рабочего цикла на двухтактный* должен повысить литровую мощность в два раза. Однако реально N_d увеличивается в 1,5...1,7 раза. Это связано с тем, что часть рабочего объема двигателя используется на организацию процессов газообмена (в нижней части цилиндра расположены окна для газообмена), снижается качество очистки и наполнения цилиндров, часть горючей смеси теряется в период их продувки, а также требуются дополнительные затраты энергии на привод продувочного насоса. Поэтому у двухтактных двигателей экономические показатели хуже, чем у четырехтактных.

Кроме того, двухтактный двигатель имеет большую тепловую напряженность элементов, формирующих камеру сгорания, из-за того, что количество теплоты, подводимой в единицу времени, в нем в два раза больше, чем у четырехтактного.

Форсирование двигателей возможно *по среднему эффективному давлению p_e* . Для этого необходимо увеличить цикловую подачу топлива и количество воздуха, подаваемого в цилиндр под давлением за счет повышения его плотности. Такой способ повышения N_d называется **наддувом**.

Различают *четыре основные типа наддува*: динамический (резонансный), наддув от приводного компрессора, газотурбинный и комбинированный.

Наддув с механическим приводом компрессора от коленчатого вала (рис. 1.5, а) позволяет хорошо согласовать работу компрессора с тяговыми характеристиками двигателя. Он обычно используется для кратковременного повышения мощности ДВС за счет невысокой степени наддува. Однако применение такого наддува вызывает существенное снижение экономичности двигателя, что обусловлено затратами энергии на привод компрессора.

Газотурбинный наддув (рис. 1.5, б) получил наиболее широкое распространение в современных двигателях. Для привода центробежного компрессора 1 используется часть энергии отработавших газов, поступающих на лопатки газовой турбины 2. Агрегат, объединяющий газовую турбину и компрессор, называют *турбокомпрессором*.

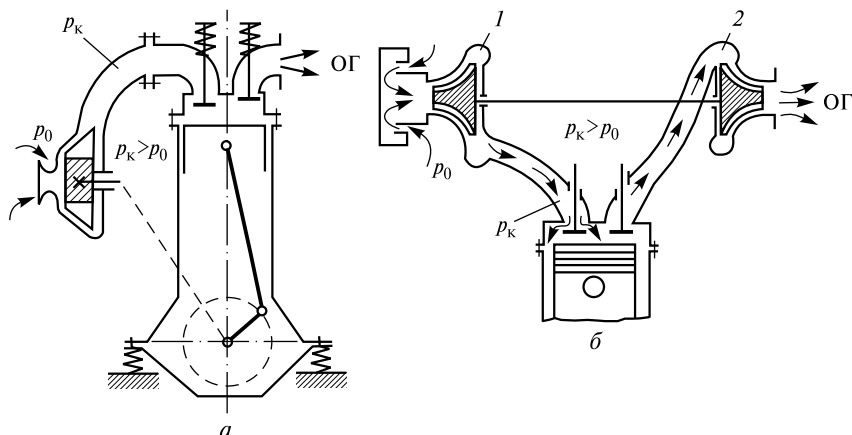


Рис. 1.5. Схемы наддува двигателя:

a — с приводным компрессором; *б* — с газотурбинным наддувом; 1 — компрессор; 2 — турбина

При газотурбинном наддуве возможны два способа использования энергии отработавших газов: при постоянном давлении перед турбиной — отработавшие газы поступают в ресивер, а затем при постоянном давлении подаются на турбину; импульсный наддув — отработавшие газы подаются непосредственно на турбину. В этом случае используется не только потенциальная, но и кинетическая энергия газов.

Импульсный наддув наиболее эффективен при малых значениях давления наддува ($p_k < 0,15$ МПа), когда энергия импульса оказывается значительно больше среднего значения давления. При больших значениях p_k эффект от применения импульсного наддува уменьшается, а при $p_k > 0,4$ МПа — практически отсутствует.

При газотурбинном наддуве механическая связь агрегата наддува с коленчатым валом двигателя отсутствует, поэтому могут существенно ухудшиться тяговые характеристики и приемистость двигателя из-за инерционности турбинного колеса. В связи со снижением энергии отработавших газов на малых нагрузках в начале разгона может не обеспечиваться подача в цилиндр требуемого количества свежего заряда. Эти недостатки могут быть устранены путем использования *комбинированного наддува* — последовательной комбинации наддува с приводным компрессором и газотурбинного наддува.

Динамический (резонансный) наддув предполагает использование колебательных явлений в системе впуска и выпуска, возникающих в результате циклического повторения процессов газообмена в цилиндре. Принцип его заключается в создании зоны сжатия

свежего заряда перед впускным клапаном до момента его закрытия, что обеспечивает увеличение массы поступающего в цилиндр заряда. Кроме того, в выпускном трубопроводе во время перекрытия клапанов за закрывающимся выпускным клапаном создается зона разрежения отработавших газов, что позволяет улучшить очистку цилиндра и полнее заполнить его свежим зарядом.

Конструктивно данная «настройка» системы осуществляется путем изменения длины и площади проходного сечения впускных и выпускных каналов. В ряде конструкций длина впускного трубопровода изменяется в зависимости от режима работы двигателя.

Динамический наддув позволяет увеличить мощность двигателя на 5... 10 %.

Применение газотурбинного наддува обеспечивает увеличение мощности двигателя на 20... 50 %.

По мере повышения степени наддува увеличивается механическая и тепловая напряженность элементов, формирующих камеры сгорания, что предъявляет повышенные требования к их конструкции и материалам, к эффективности системы охлаждения и качеству используемого масла. Для повышения степени наддува и снижения высокой тепловой напряженности лопаток турбины в системе наддува организуют охлаждение наддувочного воздуха.

В двигателях с искровым зажиганием применение наддува требует принятия специальных мер по предотвращению нарушения процесса сгорания, называемого детонацией: некоторого снижения степени сжатия, интенсификации охлаждения деталей камеры сгорания.

1.5. Понятие о характеристиках двигателя

Двигатели в составе транспортных средств, тракторов и дорожно-строительных машин работают в широком диапазоне постоянно меняющихся скоростных и нагрузочных режимов, которые определяются изменением внешней нагрузки, возможностями двигателя и характером управляющих воздействий на него.

Режим работы двигателя определяется сочетанием его *нагрузки*, характеризуемой параметрами: средним эффективным давлением p_e , эффективным крутящим моментом M_k или эффективной мощностью N_e , и *частоты вращения коленчатого вала* n .

Установившимся режимом называется режим, при котором параметры, характеризующие этот режим, и тепловое состояние двигателя не изменяются во времени. При оценке постоянства указанных параметров не принимается во внимание циклический характер работы двигателя (т.е. колебания параметров в течение цикла), а также случайные их отклонения от цикла к циклу, вызванные неидентичностью последних.

Варьирование мощности двигателя N_e на каждом скоростном режиме осуществляется изменением положения органа управления двигателем — педали управления дроссельной заслонкой или подачей топлива (для дизеля).

Для оценки эффективности функционирования двигателя на разных режимах и при различных значениях регулировочных параметров служат **характеристики двигателя** — зависимости основных показателей работы двигателя от режима работы или от параметров, связанных с регулировкой его основных систем.

Скоростной характеристикой называется зависимость показателей работы двигателя от частоты вращения коленчатого вала n при неизменном положении органа управления двигателем (дроссельной заслонки — для двигателя с искровым зажиганием, рычага управления подачей топлива — для дизеля).

Скоростная характеристика, получаемая при полном открытии дроссельной заслонки или предельном положении рычага управления, обеспечивающем достижение номинальной мощности дизеля, называется *внешней скоростной характеристикой*. Она является паспортной для большинства двигателей транспортных машин и позволяет оценить предельные мощностные показатели и определить экономичность двигателей при работе на полных нагрузках. На графике внешней скоростной характеристики двигателя (рис. 1.6) рассмотрим области активных и пассивных режимов его работы.

Выше оси абсцисс расположена область активных режимов работы двигателя, для которых характерна положительная работа двигателя ($M_k > 0$).

Сверху область активных режимов двигателя ограничена максимально возможными или максимально допустимыми значениями крутящего момента M_k , которые двигатель может развивать

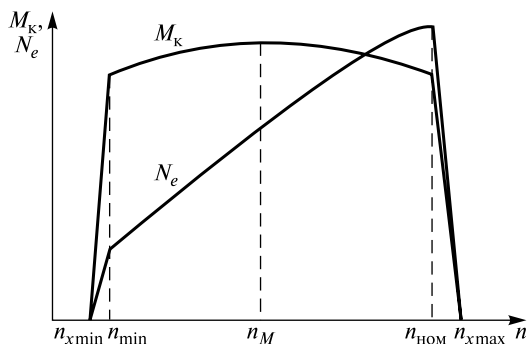


Рис. 1.6. Поле режимов работы автомобильного двигателя

на каждом скоростном режиме при предельном положении органа управления.

Максимальная нагрузка, которую двигатель может преодолеть на каждом скоростном режиме, зависит от наполнения двигателя воздухом, качества рабочего процесса и механических потерь. В дизеле эта нагрузка ограничивается допустимой тепловой и динамической напряженностью деталей, а также качеством рабочего процесса, от которого зависит экономичность двигателя и дымность отработавших газов.

Справа область активных режимов работы двигателя ограничена *ветвью снижения крутящего момента* при частоте вращения выше номинальной (двигатели с искровым зажиганием легковых автомобилей) или *регуляторной ветвью* (дизели и двигатели с искровым зажиганием грузовых автомобилей). Значение максимальной частоты вращения n_{\max} , соответствующее $N_e = 0$, называется *максимальной частотой вращения холостого хода* $n_{x\max}$ или частотой «раскрутки» регулятора (ограничителя). При этом *номинальной* называется *частота вращения* $n_{\text{ном}}$, при которой определяется объявленное заводом-изготовителем значение номинальной мощности $N_{e\text{ном}}$.

Слева область активных режимов ограничена минимально устойчивой частотой вращения при данной нагрузке. Наименьшая частота вращения коленчатого вала n_{\min} , определяемая при полностью открытой дроссельной заслонке или полной подаче топлива, при которой двигатель работает устойчиво не менее 10 мин, зависит от суммарного момента инерции вращающихся и возвратно-поступательно движущихся масс системы «двигатель — потребитель», качества рабочего процесса, определяющего стабильность и воспроизводимость последовательных рабочих циклов. Значение $n_{x\min}$ устанавливается техническими условиями на двигатель.

Снизу область активных режимов ограничивается *режимами холостого хода*, которым соответствуют точки, расположенные на оси абсцисс. На этих режимах $N_e = 0$ — двигатель не производит эффективной работы. Режимы охватывают диапазон частот вращения от минимальной холостого хода $n_{x\min}$ до частоты раскрутки регулятора $n_{x\max}$.

Ниже оси абсцисс расположена область пассивных режимов работы двигателя, характерная для режимов *принудительного холостого хода*. Они возникают при торможении машины двигателем и неумелых действиях водителя во время переключения передач. Данная область ограничена кривой крутящего момента $M_k < 0$, необходимого для проворачивания неработающего двигателя.

Нагрузочной характеристикой называется зависимость показателей двигателя от нагрузки на двигатель (p_e , M_k или N_e) при постоянной частоте вращения коленчатого вала. Она позволяет определить предельную для данной частоты вращения мощность

двигателя, а также экономичность его работы при различных нагрузках.

На практике также используют **регулируемые характеристики**, представляющие собой зависимости показателей работы двигателя от регулируемого параметра (коэффициента избытка воздуха, угла опережения зажигания, угла опережения впрыскивания топлива). Эти характеристики используют для определения оптимальных параметров работы систем подачи топлива и зажигания.

Экспериментально характеристики ДВС определяют на специальных стендах, позволяющих во всем диапазоне режимов создавать внешнюю нагрузку (имитировать потребителя) и поглощать (использовать) производимую им механическую работу. Устройства, выполняющие эту функцию, называют *тормозами*. Стенды оборудуют средствами измерений основных показателей двигателя и параметров его рабочих процессов. Методы стендовых испытаний регламентированы государственными и международными стандартами (ГОСТ, ISO, DIN, SAE и др.).

1.6. Работа двигателя в составе транспортного средства

При равномерном движении транспортного средства без изменения положения управляющего органа крутящий момент, развиваемый двигателем M_k (рис. 1.7), соответствует моменту сопротивления дороги M_c (внешняя нагрузка).

С изменением внешней нагрузки M_c и неизменном положении органа управления двигателем частота вращения коленчатого вала n и скорость движения автомобиля v_a автоматически изменяются в сторону сближения значений M_c и M_k .

Проанализируем работу двигателя при движении автомобиля на одной передаче и постоянном положении органа управления двигателем для различных дорожных условий.

При движении по горизонтальному участку дороги значения $n = n_1$, $v_a = v_{a1}$ постоянны, а значения крутящего момента двигателя и момента сопротивления дороги равны ($M_{k1} = M_{c1}$) в точке 1.

Когда автомобиль движется в гору, момент сопротивления дороги M'_c становится больше крутящего момента двигателя M_{k1} . Поэтому двигатель уменьшает частоту вращения с n_1 до n_2 , пока значения моментов вновь не станут равными ($M_{k2} = M_{c2}$ в точке 2).

При восстановлении движения по горизонтальному участку дороги ($M''_c < M_{k2}$) происходит возврат в исходное состояние — частота вращения двигателя увеличивается до $n = n_1$, а $M_{k1} = M_{c1}$.

При движении под гору M_c уменьшается ($M''_c < M_{k1}$) и, следовательно, частота вращения коленчатого вала возрастает до достижения равенства моментов $M_{k3} = M_{c3}$ (точка 3).

Во время эксплуатации транспортного средства двигатель значительное время работает в условиях *неустановившихся* (*переход-*

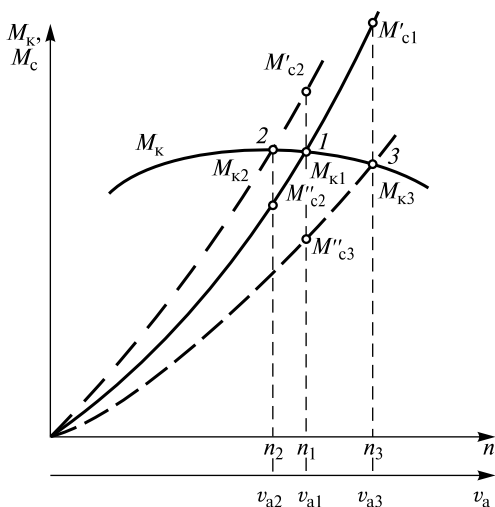


Рис. 1.7. Анализ работы двигателя в составе транспортного средства

ных) режимов, при которых его показатели и тепловое состояние постоянно меняются во времени. Такие режимы возникают при изменении мощности и частоты вращения, при разгоне и торможении транспортного средства двигателем и т.д. В этих условиях показатели двигателя значительно отличаются от полученных на установившихся режимах.

С учетом условий эксплуатации для каждой конкретной категории транспортных средств, можно определить совокупность наиболее характерных режимов работы двигателей.

При движении автомобиля в *городских условиях* для двигателя характерны относительно большие интервалы работы на режимах разгона, торможения, частичных нагрузок и холостого хода.

При эксплуатации транспортного средства *на междугородних перевозках* большую часть времени двигатель работает на установившихся режимах, близких к режиму номинальной мощности.

Контрольные вопросы

1. По каким параметрам классифицируют двигатели?
2. Опишите последовательность тактов и рабочих процессов четырехтактного бензинового двигателя.
3. Опишите последовательность тактов и рабочих процессов четырехтактного дизеля.
4. Что такое степень сжатия? Какие значения степеней сжатия у современных двигателей с искровым зажиганием и дизелей?
5. Что такое угол опережения впрыскивания и для чего он необходим?

6. Что такое угол опережения зажигания и для чего он необходим?
7. Что такое свежий заряд и рабочая смесь?
8. Для чего необходим параметр «коэффициент избытка воздуха»? Дайте определение коэффициента избытка воздуха.
9. Что такое бедная и богатая смесь? Каким параметром описывается состав смеси?
10. Перечислите основные виды механических потерь в двигателе.
11. Перечислите основные виды тепловых потерь в двигателе.
12. Дайте определение КПД: индикаторного, механического и эффективного. Как эти КПД связаны между собой?
13. Как взаимосвязаны экономические показатели двигателя?
14. Как взаимосвязаны мощностные показатели двигателя?
15. Сравните методы форсирования двигателей.
16. Сравните методы наддува двигателей.
17. Перечислите основные характеристики двигателя.
18. Расскажите о работе двигателя в составе транспортного средства при изменении дорожных условий.