КАДЫРОВ С. М.
НИКИТИН С. Е.
КАРУНИН А. Л.

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОЮЗ «АНДРОНИК»

АВТОМОБИЛЬНЫЕ И ТРАКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

С.М. КАДЫРОВ, С.Е. НИКИТИН,
Л.А. АХМЕТОВ

АВТОМОБИЛЬНЫЕ И ТРАКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования РУз в качестве учебника для студентов технических ВУЗов.

Москва-2007

Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений, специализирующихся по эксплуатации автомобилей, тракторов, дорожно-строительных, сельскохозяйственных и лесомелиоративных машин и составлен с учетом влияния эксплуатационных условий жаркого климата, высокой запыленности воздуха и высокогорья, характерных для стран Азии, Африки, Южной Америки.

В учебнике рассмотрены: термодинамические и действительные циклы ДВС; топлива, горючие смеси и продукты сгорания; процессы газообмена, сжатия, смесеобразования, сгорания и расширения. Отдельно рассмотрены: технико-экономические показатели двигателя; системы питания топливом и экологические показатели ДВС. Особое место в книге занимают: характеристики ДВС; регуляторы частоты вращения; наддув и тепловой баланс. Кратко рассматривается динамика ДВС. Особое место в книге занимают системы: смазки, охлаждения, подачи воздуха.

В учебнике рассматриваются причины ухудшения различных показателей работы двигателя в условиях жаркого климата, пониженного атмосферного давления, высокой запыленности и т.п., а также возможности уменьшения негативного влияния эксплуата-ционных факторов на его эффективность, работоспособность и безотказность. Рассматривается возможность использования в двигателях заменителей стандартных жидких топлив – горючих газов. Даются основные понятия о надежности, долговечности и безотказности поршневых двигателей в отмеченных эксплуатационных условиях. Приводятся технико-эксплуата-ционные показатели, оценочные параметры и характеристики двигателей разных типов и модификаций. Рассматриваются современные тенденции совершенствования поршневых двигателей разных типов и перспективы развития других силовых агрегатов.

Рецензенты: Заслуженный деятель науки и техники России, д-р техн. наук, профессор **Р. П. Доброгаев (МАМИ)** и профессор **М. Ташпулатов (ТГТУ).**

ВВЕДЕНИЕ

1. Общие сведения

На автомобильном транспорте, в сельском хозяйстве, дорожном строительстве, на лесо- и мелиоративных работах основными силовыми агрегатами машин являются поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Они широко применяются в различных отраслях народного хозяйства для привода самоходных машин, передвижных механизмов и транспортных установок вследствие высокой топливной экономичности, надежности и долговечности, постоянной готовности к быстрому вводу в действие (пуску), достаточной компактности, возможности автономной работы на большом удалении от мест постоянного базирования и населенных пунктов. На долю ДВС приходится более 80% всей вырабатываемой человечеством механической энергии. Ежегодно в мире производится свыше 60 млн. ДВС для замены изношенных и устаревших и расширения парка действующих машин.

Под двигателем внутреннего сгорания понимается тепловая машина, предназначенная для получения механической энергии за счет сжигания топлива, в которой химические реакции сгорания, приводящие к выделению теплоты, и превращение ее в работу, осуществляются в рабочем органе, называемом цилиндром. Цилиндр оснащается подвижным элементом — поршнем, в связи с чем двигатель внутреннего сгорания иногда называют поршневым двигателем.

Первый промышленный поршневой ДВС был построен во Франции в 1860 г. Е. Ленуаром. ДВС работал по двухтактному циклу и имел золотниковое газораспределение. В качестве топлива использовался светильный газ, поджигаемый от электрической искры.

В 1876 г. Н. Отто (Германия) создал четырехтактный газовый ДВС с предварительным сжатием горючей смеси, оказавшийся вдвое экономичнее двигателя Ленуара. В ДВС Н. Отто реализовался предложенный в 1862 г. Бо-де-Роша (Франция) цикл со сжиганием смеси при постоянном объеме. К концу XIX в. была освоена промышленная переработка нефти, что позволило использовать в ДВС помимо газовых топлив жидкие.

С этого времени началось широкое применение ДВС в промышленности и на транспорте.

В 1895 г. Р. Дизель (Германия) запатентовал цикл, а в 1897 г. построил первый реализующий этот цикл ДВС, в котором использовался принцип воспламенения топлива впрыскиванием его в распыленном состоянии в среду нагретого от сжатия воздуха. ДВС, работающий по этому принципу, оказался значительно экономичнее по расходу топлива, чем двигатель с искровым зажиганием.

В 1899 г. в России был выпущен первый промышленный четырехтактный ДВС с воспламенением от сжатия, в котором в отличие от двигателя Р. Дизеля, работавшего на керосине, использовалась дешевая сырая нефть. В 1901 г. Г. В. Тринклер (Россия) реализовал на опытном ДВС бескомпрессорный способ распыливания топлива, получивший в настоящее время повсеместное применение в дизелях. С начала XX в. ДВС стали быстро вытеснять господствовавшие в то время паровые машины.

Успешное развитие, разработка новых конструкций ДВС и улучшение их показателей стали возможны в результате глубоких научных исследований и создания теории рабочего процесса отечественными учеными В. И. Гриневецким, Н. Р. Брилингом, Е. К. Мазингом, Б. С. Стечкиным. Большие заслуги в развитии отечественного и мирового двигателестроения принадлежат русским инженерам И. С. Костовичу, Я. В. Мамину, Р. Н. Шелесту, советским ученым и конструкторам А. А. Микулину, В. Я. Климову, А. Д. Швецову, А. Д. Чаромскому, В. А. Константинову, В. М. Яковлеву и др.

Производство ДВС в России стало быстро развиваться после 30-х годов XX века. Было организовано массовое производство ДВС для автомобилей и тракторов, строительного, сельскохозяйственного и дорожного машиностроения, других отраслей народного хозяйства, построены крупные по тем временам Сталинградский и Харьковский тракторные заводы, Ярославский и Горьковский автозаводы, заново реконструирован Московский автозавод (ныне ЗиЛ).

Во время II-мировой войны двигателестроение внесло большой вклад в победу. Фронту и тылу были поставлены сотни

тысяч надежных ДВС, хорошо приспособленных к условиям эксплуатации. После победы в кратчайший срок были восстановлены разрушенные во время войны тракторные заводы, построены новые заводы по производству сельхозмашин, автобусов и легковых автомобилей. В 60-х гг. завершилась полная дизелизация тракторного парка. Развивалась унификация агрегатов и двигателей, специализация производства. В Волгограде, Минске, Барнауле, Харькове, Владимире сосредоточилось производство дизелей для тракторов. Перешел на производство дизелей для автомобилей бывший Ярославский автозавод (теперь Ярославский моторный). Выпускают продукцию Заволжский и Мелитопольский моторные заводы. Появились специализированные заводы по выпуску узлов и агрегатов для ДВС и машин: топливной аппаратуры, электрооборудования, подшипников качения, поршневых комплектов, литья, шинные и др.

Автотракторное двигателестроение представляет собой массово-поточное производство с современным уровнем механизации, автоматизации и специализации, с высокопроизводительным оборудованием и совершенной технологией. Важные вехи в развитии автомобиле- и двигателестроения — ввод в действие Волжского завода легковых автомобилей в г. Тольятти, Камского комплекса по производству грузовых автомобилей и дизелей в Набережных Челнах, создание мощных производственных объединений «АвтоЗиЛ», «АвтоВАЗ», «Автодизель», «АвтоМосквич» и др.

Двигателестроительные заводы автомобильной промышленности и сельскохозяйственного машиностроения помимо нужд этих отраслей удовлетворяют основную долю потребности дорожного и строительного машиностроения в силовых агрегатах и прежде всего в дизелях, которыми оснащено большинство дорожно-строительных машин. За период с 1950 по 1980 гг. производство автомобильных ДВС возросло более чем в 5,5 раза и тракторных — более чем в 7 раз, а средняя мощность их увеличилась в 13,7 раза.

Наряду с количественным ростом выпуска автотракторных ДВС, совершенствовались их технико-экономические показатели. Усилия двигателе- строителей были нацелены на снижение

эксплуатационных расходов топлива, увеличение агрегатной мощности силовых установок за счет применений наддува, снижение металлоемкости при одновременном повышении моторесурса, улучшение экологических характеристик (снижение токсичности, шума, вибраций), уменьшение трудоемкости технического обслуживания, автоматизацию процессов регулирования, включая работу ДВС по заданным параметрам, расширение номенклатуры применяемых топлив. Дальнейшее ускорение развития производства грузовых автомобилей с дизелями, в том числе и средней грузоподъемности, позволит обеспечить экономию десятков миллионов тонн нефтяного топлива.

В настоящее время продолжается работа по улучшению структуры парка: увеличивается выпуск автомобилей грузоподъемностью более 8 и менее 2 т при сокращении автомобилей грузоподъемностью 2—5 т. Осваивается выпуск высокоэффективных карьерных автосамосвалов грузоподъемностью 110 — 180 т и автобусов с дизелями. Расширяется производство автопоездов, прицепов, автомобилей со специальными кузовами, что обеспечивает высокую производительность и снижает металлоемкость транспортных средств. Часть выпускаемых автомобилей средней грузоподъемности переводится на природный и сжиженный газы. Развивается серийное производство полноприводных автомобилей и автопоездов высокой проходимости, а также самосвалов для перевозки сельскохозяйственных грузов. Ужесточаются ГОСТы по выбросу автомобильными ДВС токсичных веществ, прежде всего окиси углерода.

В сельхозмашиностроении возрастает производство мощных тракторов с комплексом специализированного оборудования, расширяется применение наддува в дизелях. Осваивается выпуск ряда новых высокопроизводительных тракторов, комбайнов, самоходных машин, кормоуборочной и другой техники. В отрасли дорожной и строительной индустрии расширяется выпуск землеройно-транспортных машин, новых видов техники для лесосечных работ, мелиоративного строительства, коммунального хозяйства. Создаются дизели с высокими технико-экономическими показателями для дорожно-строительных машин большой производительности. Осваиваются новые мощности по

выпуску машин для сельского хозяйства, в т. ч. погрузчиков, бульдозеров, самоходных скреперов, дреноукладчиков, роторных канавокопателей и очистителей, машин для поливной техники и мелиорации.

На машинах этой группы силовой агрегат — один из самых сложных и дорогих в производстве и эксплуатации, так как показатели его работы зависят от большого числа разнородных факторов. В свою очередь, производительность, экономичность, надежность машин, их эксплуатационные качества и безопасность использования во многом определяются эффективностью работы и состоянием ДВС.

Таким образом, для успешного выполнения задач, стоящих перед автохозяйствами, машинопрокатными станциями, базами и другими подразделениями, занятыми организацией работы, эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом автомобилей, тракторов, дорожно-строительных, сельскохозяйственных, агро- и лесомелиоративных машин, их инженерно-технический персонал должен уделять первостепенное внимание поддержанию ДВС в надлежащем техническом состоянии и готовности к работе, обеспечению своевременного и качественного обслуживания, эффективной загрузке машин.

Парк машин данной группы исчисляется в нашей стране миллионами единиц, а ежегодные затраты на их производство, эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт — миллиардами рублей. Поэтому даже незначительная экономия топлива, смазочных и других материалов, небольшое снижение расходов на ремонт и замену изношенных деталей, повышение надежности и долговечности, уменьшение времени простоя в неисправном состоянии, рационализация режимов работы и методов применения ДВС и машин в масштабе всего народного хозяйства могут дать огромный экономический эффект, выражающийся в сохранении миллионов тонн топлива, десятков тысяч тонн конструкционных и эксплуатационных материалов, миллионов рублей и часов рабочего времени, высвобождении для других целей десятков тысяч транспортных и других машин и дефицитных рабочих рук.

Для реализации этих целей необходимо знать сущность и закономерности протекания рабочего процесса в ДВС, воз-

действие на показатели его работы основных конструктивных, режимно-эксплуатационных, регулировочных и атмосферно-климатических факторов, изменение показателей под действием внешних эксплуатационных и внутренних, связанных с состоянием ДВС, условий. Зная их, можно наметить и реализовать лучшие методы организации работы машин, исходя из особенностей характеристик ДВС, принять необходимые меры по их техническому обслуживанию и ремонту в соответствии с современными эксплуатационными, экономическими и экологическими требованиями.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ДВС

ДВС классифицируются по ряду характерных признаков[1]:

1. **По назначению** они могут быть стационарными и транспортными. Это деление определяет массогабаритные показатели, регулировки ДВС, режимы работы, конструктивные особенности. В пределах каждой группы ДВС существенно различаются в зависимости от конкретных условий работы силовой установки или транспортной машины. Автотракторные ДВС относятся к группе транспортных. Дальнейшая классификация дается применительно к ДВС этой группы.

2. **По способу осуществления газообмена** — четырех - и двухтактными. Преобладающее большинство автотракторных ДВС являются четырехтактными.

3. **По роду применяемого топлива.**

- *Легкое жидкое топливо.* Двигатели этой группы работают на бензине и применяются в основном на легковых автомобилях, грузовых автомобилях малой и средней грузоподъемности, автобусах малой вместимости, на сельскохозяйственных и других машинах малой мощности. В последние годы в ДВС этой группы начинают использовать спирты или их смеси с бензином.
- *Тяжелое жидкое топливо.* На нем работают дизели, применяющиеся в тракторах и других сельскохозяйст-

[1] Приведенная классификация не охватывает всех имеющиеся видов ДВС.

венных машинах, агро- и лесомелиоративной технике, на дорожных и строительных машинах, на тяжелых грузовых автомобилях, самосвалах, тягачах, автобусах большой вместимости. В последние годы нарастает тенденция дизелизации грузовых автомобилей средней и даже малой грузоподъемности и автобусов средней вместимости. Резко расширилось также применение дизелей на легковых автомобилях и спецавтомобилях на их базе.

- *Газообразное топливо.* На него переводят автомобильные ДВС, работающие на легком топливе, когда желательно применение более дешевых или более доступных местных видов топлива или необходимо снижение токсичности - отработавших газов, особенно в городах. Газовое топливо хранится на транспортных машинах в сжиженном или сжатом состоянии, что определяет в известной мере и особенности ДВС. Автомобильные или тракторные ДВС, специально созданные для работы на газовом топливе, используются редко.

ДВС могут быть двухтопливными и многотопливными:

Двухтопливные — это дизели, приспособленные для работы на газе, а также бензиновые двигатели, переведенные на сжиженный газ. В первом случае газ является основным топливом, а жидкое топливо расходуется в небольшом количестве для запуска ДВС и воспламенения горючей смеси в цилиндрах. Во втором случае ДВС имеет две системы питания и может работать как на жидком, так и на газовом топливе, что обеспечивает определенные эксплуатационные удобства. ДВС первой группы на машинах рассматриваемого типа применяются редко.

Многотопливные — это дизели специального назначения, приспособленные для работы как на тяжелых, так и на легких жидких топливах с различными характеристиками.

4. По способу воспламенения горючей смеси — с воспламенением от сжатия (дизели) и с принудительным искровым зажиганием (бензиновые и газовые ДВС). На многотопливных дизелях при использовании трудновоспламеняющихся топлив (бензины, спирты) нередко применяют принудительное зажигание.

5. По способу смесеобразования — с внешним и внутренним смесеобразованием. Бензиновые и газовые двигатели относятся к группе ДВС с внешним смесеобразованием, так как горючая смесь приготовляется в основном вне цилиндра. В цилиндре этот процесс лишь завершается. Дизели относятся к группе ДВС с внутренним смесеобразованием. В некоторых случаях на бензиновых автомобильных ДВС топливо впрыскивается непосредственно в цилиндр, а смесь поджигается электрической искрой. Такие ДВС также относятся к группе с внутренним смесеобразованием. В настоящее время применение этих ДВС еще весьма редко. В двухтопливных дизелях газовое топливо смешивается с воздухом вне цилиндра, тогда как дизельное топливо впрыскивается непосредственно в камеру сгорания цилиндра. В этих двигателях используется как внешнее, так и внутреннее смесеобразование.

6. По способу охлаждения — с жидкостным и воздушным охлаждением. В автотракторных ДВС используются оба способа охлаждения, однако большинство ДВС имеет жидкостное охлаждение с помощью воды или низкозамерзающих и высококипящих жидкостей.

7. По способу регулирования количества теплоты, подводимой за цикл, — с качественным, количественным и смешанным регулированием. При *качественном* регулировании, присущем дизелям, изменяется цикловая доза топлива при почти неизменном количестве воздуха, подаваемого в цилиндр. При этом меняется средний состав или качество смеси. При *количественном* регулировании, характерном для обычных бензиновых и газовых двигателей, изменяется количество горючей смеси, вводимой в цилиндр за цикл. При этом как правило несколько изменяется и состав, т. е. качество смеси, поэтому название метода регулирования несколько условно. При *смешанном* регулировании может изменяться как состав, так и количество горючей смеси, подаваемой в цилиндр за цикл. Этот метод характерен для ДВС со впрыском бензина в цилиндр и двухтопливных дизелей.

8. По впуску свежего заряда в цилиндры — с естественным впуском из атмосферы и с наддувом.

Большинство современных ДВС работают с естественным впуском свежего заряда. Наддув применяется для повышения мощности, главным образом дизелей. В последнее время использование наддува постепенно расширяется, в т. ч. применительно к бензиновым ДВС. Одним из основных препятствий использования наддува в бензиновых ДВС является возможность возникновения детонации, появление которой облегчается при наддуве.

9. По виду движения поршней — поршневые и роторно-поршневые. В *поршневых* ДВС поршень осуществляет в цилиндре возвратно-поступательное движение. К поршневым относятся подавляющее большинство ДВС автотракторного типа. В *роторно-поршневых* ДВС поршень осуществляет в корпусе планетарное движение. При этом между стенками корпуса и поршня образуются полости переменного объема, в каждой из которых реализуется рабочий цикл. ДВС этой группы применяются очень ограниченно.

10. По расположению цилиндров:

— *однорядные с* вертикальным, наклонным и горизонтальным расположением;

— *двухрядные* с *V*-образным и оппозитным расположением. Большинство ДВС малой и средней мощности (до 50—70 кВт) с числом цилиндров не выше шести имеют однорядное вертикальное или наклонное расположение цилиндров. Двухрядное *V*-образное расположение имеют ДВС средней или большой мощности с шестью и более цилиндрами. Однорядное горизонтальное или двухрядное оппозитное расположение цилиндров имеют ДВС со специфической компановкой на машине (под платформой грузового автомобиля, кузовом автобуса, кабиной водителя, багажником и т. п.). Встречаются ДВС и с иным расположением цилиндров.

3. ОЦЕНОЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВС

Качества ДВС, соответствие его предъявляемым требованиям, оценка в сравнении с другими силовыми агрегатами характеризуются различными показателями. В зависимости от назначения ДВС или машины и конкретных условий ее экс-

плуатации значимость различных показателей несколько меняется. К основным оценочным показателям ДВС относятся:[2]

- *Топливная экономичность,* определяемая расходом топлива на единицу, совершенной работы, оценивается так называемым удельным эффективным расходом топлива. При сравнении экономичности ДВС, работающих на разных топливах, более объективным показателем является эффективный к.п.д., представляющий собой отношение теплоты, превращенной в работу на выходном валу ДВС, к теплоте, которая может выделиться при полном сгорании израсходованного топлива. Для получения более объективных данных сравнение или оценка ДВС производятся при сопоставимых условиях работы.
- *Удельная масса, т.е.* конструктивная масса комплектного, силового агрегата, отнесенная к единице отдаваемой мощности.
- *Литровая мощность,* представляющая собой номинальную мощность ДВС, отнесенную к одному литру рабочего объема всех его цилиндров.
- *Надежность двигателя,* т. е. свойство его сохранять эксплуатационные характеристики в установленных пределах, а также безотказность узлов и деталей в условиях нормального использования за определенный интервал работы, называемый моторесурсом. Моторесурс тракторных ДВС выражают в часах работы, а автомобильных — в километрах пробега.
- *Степень токсичности выбросов,* оцениваемая количеством выброшенных в окружающую среду токсичных веществ и загрязнителей, отнесенным к единице совершенной работы. Методы и условия оценки токсичности определяются стандартами и регламентируются действующими нормами.
- *Шумность работы,* оцениваемая уровнем и спектром акустического излучения. Методы и условия измерения шума регламентируются действующими стандартами, техническими условиями и допустимыми нормами.

---

[2] Далее оценочные показатели рассматриваются подробнее.

- *Надежность пуска,* определяемая минимальной температурой безотказного пуска из непрогретого состояния с помощью серийных устройств.

В качестве оценочных показателей ДВС используются также стоимость изготовления, простота конструкции, удобство технического ухода, трудоемкость ремонта и технического обслуживания, а также другие производственные и эксплуатационные характеристики.

Автотракторные ДВС в эксплуатационных условиях работают при непрерывном изменении частоты вращения коленчатого вала и крутящего момента, пределы и скорость вариации которых определяются назначением приводимых ими машин, спецификой выполняемых работ и квалификацией обслуживающего персонала. При этом автомобильные ДВС большую часть времени, особенно в условиях городской езды, работают при частичных нагрузочных и скоростных режимах, тогда как тракторные и особенно двигатели дорожно-строительных машин основную часть времени работают при полных или почти полных нагрузках, а иногда и с перегрузкой и резкой сменой режима. ДВС сельскохозяйственных машин и тракторов, дорожно-строительных и мелиоративных машин работают к тому же в условиях высокой запыленности окружающего воздуха, подвержены непосред-ственному воздействию атмосферных осадков, часто хранятся под открытым небом.

Особенности работы и содержания ДВС во многом определяют их топливную экономичность, надежность, долговечность, износы деталей и узлов, стоимость ремонта и технического обслуживания, а также токсические и другие показатели.

4. СПЕЦИФИКА ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РЕГИОНОВ С ЖАРКИМ КЛИМАТОМ И ВЫСОКОГОРЬЯ

Автомобили, тракторы, дорожно-строительные, мелиоративные и сельскохозяйственные машины общего назначения, а также их силовые агрегаты конструируются, изготавливаются и регулируются, как правило, применительно к условиям с умеренным климатом и равнинных зон. Существенное отличие регионов с жарким климатом и высокогорья от расчетных

заметно отражается на показателях и характеристиках машин. В наибольшей мере это относится к ДВС, рабочий процесс и выходные показатели которых зависят от самых разнообразных факторов.

Рассмотрим основные природно-климатические особенности отмеченных регионов, влияющие на изменение процессов, происходящих в цилиндрах ДВС, на функционирование их систем и показатели работы.[3] К регионам с жарким климатом и высокогорья относятся: регионы Средней Азии, Южная часть Казахстана, страны Востока (Индия, Китай, Пакистан, Непал, Афганистан, Турция, Иран, Египет и др.), Африка, Южная Америка, часть штатов США (Калифорния) и др.

Отмеченные регионы включают равнинные, полупустынные и пустынные зоны, а также горные районы и характеризуется резко континентальным климатом с большими сезонными и суточными колебаниями температуры. Например, среднегодовое количество часов солнечного сияния в г. Ташкенте, Ашхабаде, Кабуле, Тегеране и др. достигает 2700—2750; равнины характеризуются засушливым климатом с продолжительным и жарким летом. В ряде районов наибольшая среднемесячная температура составляет 35—40°С, максимальная суточная температура достигает 45—50°С, а температура песка в пустынных зонах — до 80°С. Солнечная радиация здесь наибольшая и достигает до 670 мДж/м^2 в год. По этому показателю Среднеазиатский регион сравним лишь с Аравией, Северной Африкой и Калифорнийским побережьем Америки. Период с отрицательными температурами составляет на севере региона 3—4 месяца, на юге около 1 месяца. Зимы для этих широт очень холодные, средние температуры января — минус 5—10°, морозы достигают минус 30°С. Годовая сумма осадков составляет 200—300 мм, причем на лето приходится всего 6%. Основное количество осадков выпадает зимой и весной. Летом влажность воздуха редко превышает 40—50%.

---

[3] Подробнее воздействие этих особенностей на отдельные стороны работы ДВС анализируется при рассмотрении действительных циклов и систем ДВС.

Горные районы характеризуются резкими различиями климатических условий на малом протяжении по горизонтали. Летние температуры составляют плюс 20—30°С, зимние достигают минус 30—35°С. Количество осадков у подножья гор составляет 300—400 мм в год, а у границ ледников — 800 — 1000 мм в год. Специфические особенности горных районов — пониженное атмосферное давление, достигающее 500 мм рт. ст., и интенсивное снижение температуры воздуха с увеличением высоты над уровнем моря.

Вода рек, водоемов и источников, используемая как правило для заправки и доливки систем охлаждения ДВС, имеет высокую жесткость, определяемую содержанием соединений магния и кальция, часто она загрязнена взвешенными твердыми мелкодисперсными частицами ила или песка. Жесткость воды в горных реках региона составляет 1,2—4,9 мг—экв/л, в равнинных реках — 8,6—17,5 мг—экв/л, в артезианских колодцах, скважинах и водоемах — 9,1—27,4 мг—экв/л. В Европейских странах с умеренным климатом воды рек как Волга, Урал, Дунай, Днепр имеют жесткость 0,5—4,5 мг—экв/л. Содержание взвешенных частиц в реках регионов с жарким климатом составляет 3—5 кг/м^3, а в притоках достигает 10—30 кг/м^3, тогда как в реках регионов с умеренным климатом — 0,05—0,2 кг/м^3.

Характерная особенность отмеченных регионов, связанная с высокой солнечной радиацией, малой влажностью воздуха и почвенно-геологическими условиями, — большая запыленность воздуха в припочвенном слое, а также мелкость и высокая абразивность пылевых частиц. Основные почвы регионов — серо-бурые, пустынные, пустынно-песчаные и сероземные. Они содержат 55—88% кварца, 12—20% глинозема, а также оксиды железа, кальция и магния и другие компоненты.

При работе почвообрабатывающих, хлопкоуборочных, землеройных и других машин, особенно в сухие периоды года, пылесодержание в воздухе достигает 3—5 г/м^3, в несколько раз превышая цифры, присущие средней полосе, даже при работе дорожно-строительных машин. Уровень и характеристики запыленности воздуха зависят от многих факторов, в частности от расстояния до поверхности грунта. Например, на высоте 0,45 м

частицы размером до 10 мкм составляют 47% от общего количества пыли, на высоте 0,65 м—66%.

Повышенная запыленность воздуха приводит к попаданию пыли в различные узлы, механизмы и соединения деталей, приводя к абразивным износам трущихся поверхностей. Наибольшим абразивным воздействием обладают частицы кварца из-за большой твердости и острых кромок граней. Опытами установлено, что интенсивность изнашивания деталей ДВС при работе на песчаной почве в 1,6 раза выше, чем на лессовой, в которой содержание кварцевых частиц на 20—25% меньше.

Природно-климатические особенности отмеченных регионов оказывают неблагоприятное воздействие на рабочий процесс, выходные показатели и эксплуатационные характеристики ДВС, существенно ухудшая их по сравнению с данными, присущими тем же ДВС в условиях с умеренным климатом. Однако правильная организация эксплуатации, технического обслуживания и содержания ДВС дает возможность ослабить негативное влияние специфических природно-климатических условий и повысить эффективность работы машинного парка.

ГЛАВА 1.
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Работа ДВС выполняется циклически, т. е. путем многократного повторения совокупности определенных процессов, осуществляемых в цилиндре. Эта периодически повторяющаяся совокупность процессов составляет действительный цикл. В результате осуществления каждого цикла потребляется теплота сгорания топливовоздушной смеси и получается работа, передаваемая на выходной вал ДВС. Реальные процессы, происходящие в цилиндрах ДВС, сложны по своей природе и трудны для анализа. Чтобы лучше понять общие закономерности превращения в ДВС затраченной теплоты в полезную работу, рассмотрим термодинамические циклы, представляющие собой теоретические прообразы действительных циклов, но более простые и удобные для анализа.

Напомним, что идеальные термодинамические циклы поршневых ДВС — замкнутые, т. е. осуществляемые с помощью одного и того же газообразного рабочего тела, возвращающегося после завершения цикла в исходное состояние. В ходе цикла количество рабочего тела и его химический состав не меняются. Теплоемкость газа не зависит от температуры. Процессы сжатия и расширения являются адиабатическими, причем цикл в целом состоит только из обратимых процессов.

Показателем совершенства теплоиспользования в термодинамическом цикле (т.е. его экономичности) является термический к.п.д.:

$$\eta_t = \frac{L_ц}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}, \qquad (1.1)$$

где $L_ц$ — теплота, превращенная в работу цикла;

Q_1 — теплота, подведенная к газу;

Q_2 — теплота, отведенная от газа.

Важный энергетический показатель цикла поршневого ДВС — среднее давление цикла:

$$p_t = \frac{L_ц}{V_h} = \frac{L_ц}{V_{max} - V_{min}}, \qquad (1.2)$$

где V_h — рабочий объем цилиндра;

V_{max} — полный объем цилиндра при положении поршня в НМТ;

V_{min} — наименьший объем цилиндра при положении поршня в ВМТ (объем камеры сжатия).

По существу среднее давление цикла является работой, получаемый за цикл с единицы рабочего объема цилиндра. Чем больше- этот показатель, тем меньше размеры цилиндра при данной величине работы цикла, а следовательно — размеры и масса ДВС при прочих одинаковых условиях.

1.1. ЦИКЛ С ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Такой цикл (рис. 1.1) является прототипом действительного цикла ДВС с искровым зажиганием (бензиновые и газовые ДВС). Из рисунка видно, что после адиабатного сжатия (ас) к рабочему телу подводится теплота q_1 при постоянном объеме *(cz)*. Далее рабочее тело адиабатно расширяется *(zb),* совершая работу. Цикл завершается отводом теплоты q_2 при постоянном объеме *(ba)*. Из схемы механизма ДВС видно, что для осуществления цикла необходимы два полных хода поршня (двухтактный цикл). При анализе цикла принято использовать следующие параметры:

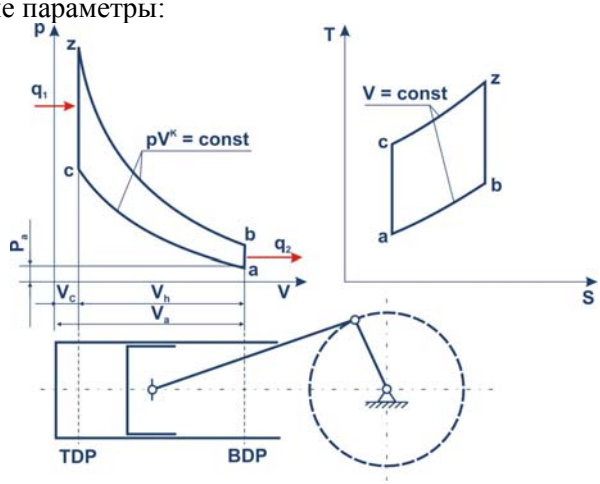

Рис. 1.1. Термодинамический цикл с подводом теплоты при постоянном объеме.

— степень сжатия $\varepsilon = \dfrac{V_a}{V_c}$;

— степень повышения давления $\lambda = \dfrac{p_z}{p_c}$.

Из термодинамики известно, что

$$\eta_{tv} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}; \qquad (1.3)$$

$$p_{tv} = \frac{p_a \cdot \varepsilon^k (\lambda - 1)}{(\varepsilon - 1)(k - 1)} \cdot \eta_{tv} = \frac{p_a \varepsilon^k (\lambda - 1)}{(\varepsilon - 1)(k - 1)} \cdot (\varepsilon^{k-1} - 1), \qquad (1.4)$$

где $k = \dfrac{C_p}{C_v}$ — показатель адиабаты.

Влияние степени сжатия на показатели цикла представлено на рисунке 1.2. Значения среднего давления цикла, а также максимальных.температур и давления газа получены при условии неизменного количества теплоты, подведенной к рабочему телу за цикл.

Из рисунка видно, что с ростом степени сжатия улучшается тепло-использование в цикле и возрастает работа, получаемая с единицы рабочего объема цилиндра. Это значит, что при повышении е при прочих неизменных условиях ДВС становится более экономичным и мощным. Однако влияние е на экономичность цикла более значительно, чем на его удельную работу. При возрастании е с 6 до 12 термический к.п.д. увеличивается в 1,25 раза, тогда как среднее давление цикла— всего в 1,14 раза.

Положительное воздействие роста степени сжатия на экономические и энергетические показатели цикла и ДВС известно давно. Настойчивое стремление повысить ее стало одним из главных направлений совершенствования поршневых ДВС с лскровым зажиганием. Основное препятствие для повышения ε в существующих ДВС — возможность возникновения детонации, которая нарушает нормальную работу двигателя и может привести к разрушению его деталей. Сущность детонации и

меры борьбы с ней рассматриваются при изучении процессов действительных циклов.

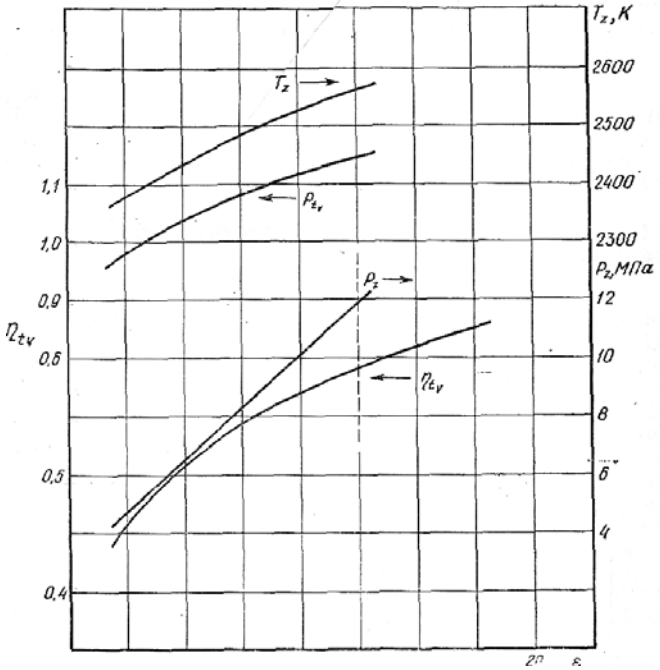

Рис. 1.2. Влияние степени сжатия на показатели цикла с подводом теплоты при постоянном объеме:
K= 1,34, T_a =300K. P_a =0,1 МПа.

На рисунке 1,2 пунктиром показано наибольшее значение степени сжатия, которое в ближайшей перспективе может быть реализовано в ДВС с искровым зажиганием, работающем по данному циклу-прототипу. Современные же ДВС этого типа имеют степень сжатия 6,5—10. Из рисунка следует, что повышение е сопровождается интенсивным возрастанием максимальных значений температуры и давления рабочего тела. А это значит, что увеличиваются тепловые и механические нагрузки на детали, окружающие камеру сгорания. Следовательно, с ростом степени сжатия приходится либо повышать качество, а значит и стоимость конструкционных материалов, либо увели-

чивать толщину стенок и поперечное сечение деталей, т. е. массу ДВС.

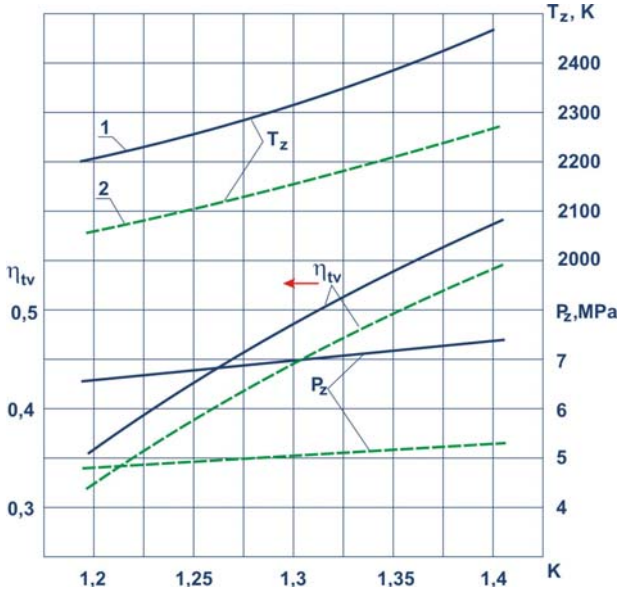

Рис. 1.3. Влияние показателя адиабаты на характеристики цикла с подводом теплоты при постоянном объеме:
T_a=300К, P_a=0,1 МПА; 1-при ε =9 и 2 – при ε =7

Рисунок 1.3 иллюстрирует влияние показателя адиабаты *fc* при двух значениях е. Величины максимального давления и температуры цикла получены при неизменном количестве теплоты, подводимой к рабочему телу. Показатель адиабаты характеризует свойства рабочего тела. Более высокие его значения присущи двухатомным газам (азот, кислород, атмосферный воздух), меньшие — газам с большим числом атомов в молекуле (углекислый газ, водяной пар), являющимся основными продуктами сгорания в действительном цикле. Промежуточные величины *k* практически получаются при смешении двухатомных газов с трехатомными в разных пропорциях. Из рисунка видно, что природа рабочего тела существенно влияет на теплоиспользование в цикле, причем экономичность его тем выше, чем больше показатель адиабаты, т. е. концентрация двухатомных газов в рабочем теле.

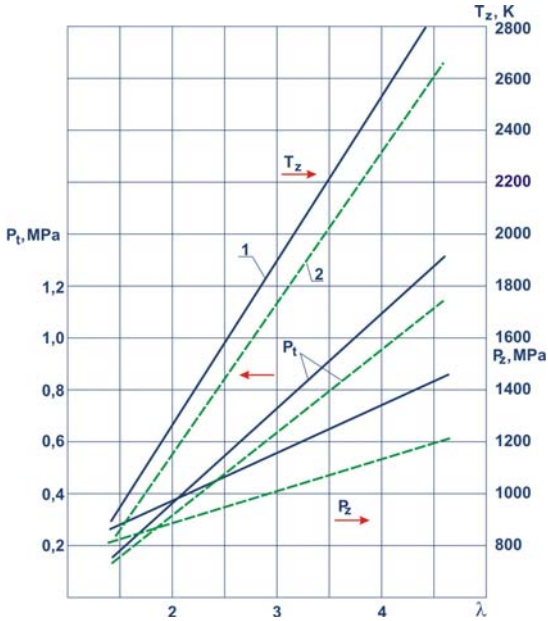

Рис. 1.4. Влияние степени повышения давления на показатели цикла с подводом теплоты при постоянном объеме:
T_a=300К, P_a=0,1 Мпа; К=1,34; 1-при ε =9 и 2 – при ε =7

Автомобильные ДВС, использующие в качестве прототипа рассматриваемый цикл, большую часть времени работают при частичных нагрузках, которые и определяют в известной мере среднюю экономичность двигателя по расходу топлива, а также нагруженность и, следовательно, долговечность ДВС. Интересно проанализировать протекание показателей цикла при изменении нагрузки, измерителем которой является работа цикла или его среднее давление. Из рисунка 1.4 видно, что при изменении среднего давления цикла (и неизменной конструктивной величине — степени сжатия) пропорционально изменяется и степень повышения давления, которая таким образом является измерителем нагрузки. При заданной величине степени сжатия теплоиспользование в цикле (т. е. его экономичность) остается изменным, что непосредственно вытекает из формулы 1.3 термического к.п.д., куда не входит степень повышения давления. В действительном цикле взаимосвязь нагрузки а теплоиспользования несколько иная, что объясняется особен-

ностями количественного метода регулирования нагрузки, используемого в ДВС данной группы.

1.2. ЦИКЛ СО СМЕШАННЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Этот цикл является прототипом действительного цикла быстроходных дизелей, в т.ч. дизелей автотракторного типа. Как показано на рисунке 1.5, после адиабатного сжатия *(ac)* к рабочему телу подводится теплота сначала при постоянном объеме q'_1 (процесс *cz'),* затем —при постоянном давлении q''_1 (процесс z*b)*. Далее рабочее тело адиабатно расширяется, совершая работу (процесс *zb)*. Цикл заканчивается отводом теплоты q_2 при постоянном объеме *(ba)*. Как н ранее рассмотренный, этот цикл осуществляется за два полных хода поршня. При анализе цикла со смешанным подводом теплоты в дополнение к уже упомянутым параметрам вводятся:

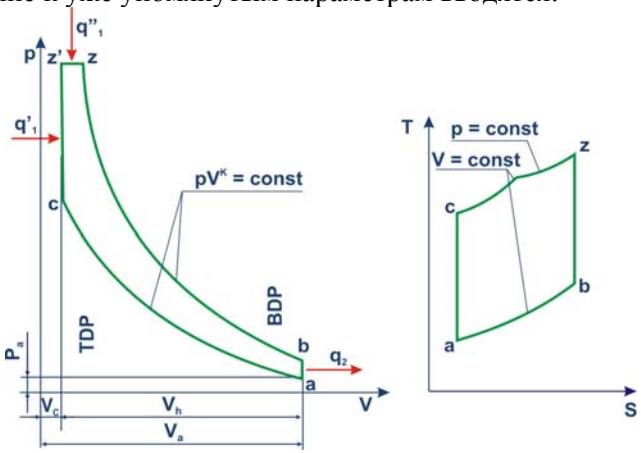

Рис. 1.5. Термодинамический цикл со смешанным подводом теплоты.

— степень предварительного расширения $\rho = \frac{V_z}{V_z'} = \frac{V_z}{V_c}$,

— степень последующего расширения $\delta = \frac{V_b}{V_z}$.

Отсюда $\varepsilon = \rho \cdot \delta$. (1.5)

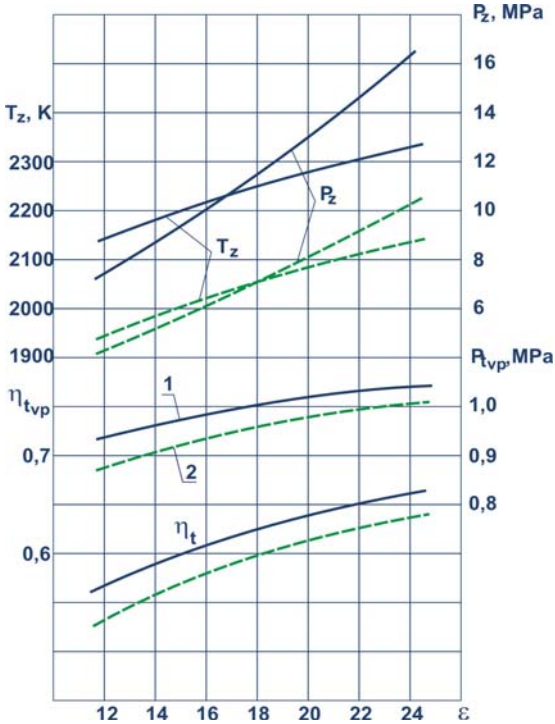

Рис. 1.6. Влияние степени сжатия на показатели цикла со смешанным подводом теплоты: ***K=1,34; 1-q'$_1$/q"$_1$=3 и 2-q'$_1$/q"$_1$=1/3.***

В термодинамике установлены следующие соотнощенш для показателей данного цикла:

$$\eta_{tvp} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda\rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}; \qquad (1.6)$$

$$p_{tvp} = \frac{p_a \varepsilon^k}{(k-1)(\varepsilon - 1)} \cdot \eta_{tvp}[\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)] =$$

$$= \frac{p_a \varepsilon^k}{(\varepsilon - 1)(k-1)} \left\{ \lambda(\rho - 1)(k-1) + \lambda\rho \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon}{\rho}\right)^{k-1}} \right] - \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right) \right\}. \qquad (1.7)$$

Сопоставление формул 1.3 и 1.6 показывает, что влияние в на экономичность цикла определяется в обоих случаях одина-

ковым соотношением и должно быть аналогичным. Однако в цикле со смешанным подводом теплоты оно осложняется совокупным воздействием λ и ρ, а также несколько иным влиянием *k.* Из формулы 1.5 видно, что изменение е неизбежно связано с р, которая определяет долю теплоты, сообщенной рабочему телу при постоянном давлении. Таким образом, влияние е на теплоиспользование должно рассматриваться во взаимосвязи с изменением распределения теплоты, подводимой при постоянном объеме и постоянном давлении.

Рисунок 1.6 иллюстрирует влияние е на показатели цикла при двух различных соотношениях между количествами теплоты, подведенной при постоянном объеме и постоянном давлении, т. е. фактически при двух отношениях λ/р, Из сравнения рисунков 1.2 и 1.6 видно, что характер влияния е на показатели данного цикла остается таким же, как и в цикле с подводом теплоты при постоянном объеме. В обоих случаях с повышением степени сжатия интенсивность возрастания экономичности цикла снижается, т. е. при определенном повышении е достигается все меньшее улучшение теплоиспользования и приращивание удельной работы цикла. И вместе с тем при увеличении е быстро растут максимальное давление и температура цикла, что сопровождается возрастанием механической и тепловой нагруженности деталей ДВС.

Организация рабочего процесса в дизеле не налагает каких-либо ограничений на повышение е, как это имело место у ДВС с искровым зажиганием. Поэтому одним из основных факторов, лимитирующих степень сжатия дизелей, являются именно тепловые и механические нагрузки деталей. Современные дизели имеют степени сжатия от 15 до 23 в зависимости от принятого типа смесеобразования и условий работы.

На рисунке 1.7 представлены рассчитанные для двух значений с зависимости показателей цикла от изменения доли теплоты, подведенной при постоянном объеме, (и при неизменном общем количестве сообщенной рабочему телу теплоты). С увеличением этой доли, т.е. приближением смешанного цикла к циклу с подводом теплоты при постоянном

объеме, η_t и p_t возрастают, т.е. с энергетической и экономической точек зрения цикл становится все более совершенным. Одновременно интенсивно нарастают p_z и T_z.

На рисунке 1.8 показано изменение некоторых параметров цикла в зависимости от k при постоянном количестве подведенной теплоты. Видно, что с ростом k экономичность цикла существенно улучшается при любом распределении подведенной теплоты.

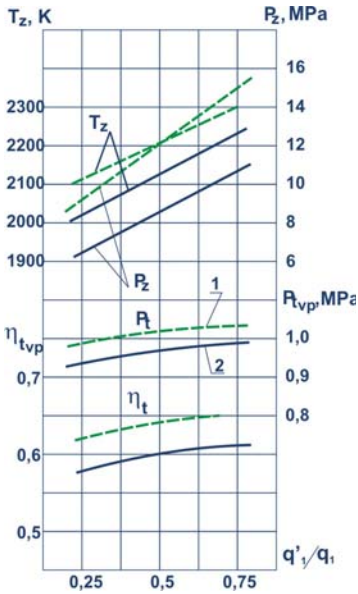

Рис. 1.7. Влияние доли теплоты, подведенной при постоянном объеме, на показатели цикла со смешанным подводом теплоты:
K=1,34; q_1=const; 1-ε=16 и 2-ε=22.

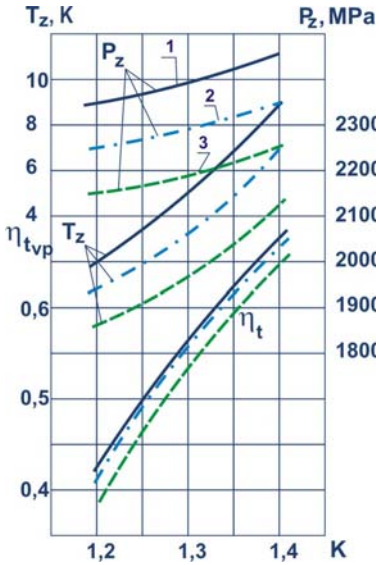

Рис. 1.8. Влияние величины *K* на показатели цикла со смешанным подводом теплоты: ε =16; q_1=const; отношение
q'_1/q''_1; 1=0,75; 2=0,5; 3=0,25.

Рисунок 1.9 иллюстрирует протекание данного цикла при изменении количества подведенной теплоты (т.е. при регулировании нагрузки). Из сопоставления двух методов

изменения q_l (за счет p при постоянной λ и за счет λ при постоянной p) видно, что при p = const с уменьшением нагрузки η_t очень незначительно снижается, что объясняется уменьшением отношения λ/p (см. рис, 1.7), а при λ=const с уменьшением нагрузки η_t заметно возрастает, так как с уменьшением подвода теплоты цикл все более приближается к ранее рассмотренному, т.е. к циклу с подводом теплоты при постоянном объеме.

Таким образом, вариант регулирования нагрузки при λ=const характеризуется постоянным p_z и более медленным, чем в варианте p = const, нарастанием T_z при повышении q_l. Поэтому с точки зрения механической и тепловой напряженности деталей ДВС при больших нагрузках этот вариант более предпочтителен. Однако для заданной величины ε экономичность цикла при этом ниже, чем в варианте с регулированием при p = const.

Из рисунка 1.9 видно, что с уменьшением нагрузки снижается уровень температуры рабочего тела, что должно вести к понижению теплоемкости газа и,.следовательно, к возрастанию показателя адиабаты. В расчетах к рисунку изменение k при вариации количества подведенной теплоты не учитывалось, что естественно отразилось на показателях цикла. Кривая *3* термического к.п.д. рассчитана с учетом изменения k при вариации циклового количества подведенной теплоты, исходя из среднего уровня температуры рабочего тела (для варианта p = const). В данном случае с уменьшением нагрузки экономичность цикла заметно повышается.

В реальных условиях изменение величины k по нагрузке обусловлено не только влиянием температурного уровня рабочего тела, но и его составом. При уменьшении нагрузки увеличивается доля двухатомных и уменьшается доля трехатомных газов в составе рабочего тела (качественное регулирование нагрузки изменением цикловой дозы топлива). Это должно привести к дальнейшему повышению k, т. е. к улучшению экономичности цикла, что и наблюдается в действительности.

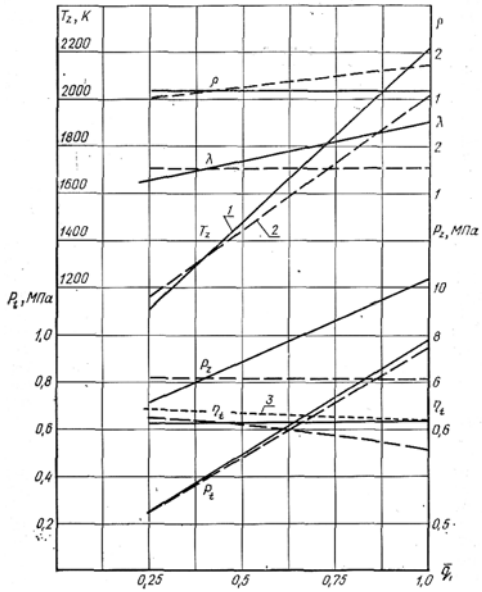

Рис. 1.9. Влияние количества теплоты q_1 на показатели цикла при
λ/p=*var*, q_{1100}= *const*, ε = 16. k =1,34:
1-$(q'_1/q_1)_{100}$ =0.75; 2-$(q'_1/q_1)_{100}$ =0.25; 3 - k= var.

1.3. ЦИКЛ ДВС С НАДДУВОМ

Повышение мощности и крутящего момента ДВС за счет наддува достигается увеличением работы цикла, отнесенной к единице рабочего объема цилиндра. Сущность наддува состоит в том, что с помощью компрессора сжимают рабочее тело перед подачей в цилиндр до давления, превышающего атмосферное. Это дает возможность при заданных размерах цилиндра ввести в него большее количество (по массе) рабочего тела, соответственно подвести большее количество теплоты и получить большую работу цикла. Широкое распространение в настоящее время получил наддув дизелей, использующих в качестве теоретического прототипа цикл со смешанным подводом теплоты. Применительно к этому циклу (см. рис. 1.5) в точке *a* будем иметь:

$$p_a = \frac{MRT_a}{V_a}, \qquad (1.8)$$

где T_a и V_a — температура газа и полный объем цилиндра.

Приняв $\frac{p}{V_a}$ = const и предположив в первом приближении, что T_a

в наддувном и безнаддувном ДВС одинакова, получим;

$$Pa = M \text{ Const.}$$

Но для заданного объема цилиндра V_a можно увеличить массу рабочего тела, заключенного в нем, лишь повышением его плотности за счет сжатия газа:

$$M = V_a \rho_a . \qquad (1.9)$$

Тогда $p_a = \rho_a$ const.

На основании формулы 1.7 можно сделать вывод, что при неизменных параметрах цикла (ε, λ, ρ, k)'среднее давление его пропорционально p_a. Для повышения плотности рабочего тела в точке *a* цикла можно использовать компрессор, приводимый от вала ДВС. При этом компрессор будет потреблять часть работы ДВС, что уменьшит чистый выигрыш от применения наддува. Более рационально использование для наддува энергии отработавших газов ДВС, выбрасываемых в реальных условиях в атмосферу. Такая система, используемая в автотракторных ДВС наиболее часто, называется турбонаддувом. При этом отработавшие газы подаются в турбину, где, расширяясь на лопатках, совершают работу, используемую для привода лопаточного же компрессора.

Теоретический цикл поршневого ДВС со смешанным подводом теплоты и турбонаддувом показан на рисунке 1.10. В более крупном масштабе (рис.1.10, *а*) показана часть цикла, соответствующая работе турбокомпрессорной части установки. По изохоре *ba* осуществляется отвод теплоты Q_{2n} в поршневом ДВС. Если в первом приближении пренебречь потерей теплоты при подаче газов на лопатки турбины, то теплота $Q_{2n} = Q_{ta}$ сообщается газу в цикле газотурбинной установки *abef* с подводом ее при постоянном объеме. Процессы *be* и *fa* являются

адиабатными. Отвод теплоты происходит при постоянном давлении *(ef)*. В результате осуществления цикла газотурбинной установки получается избыточная полезная работа газа эквивалентная в координатах *pV* площади фигуры *abef,* которая может быть отобрана непосредственно с вала газовой турбины.

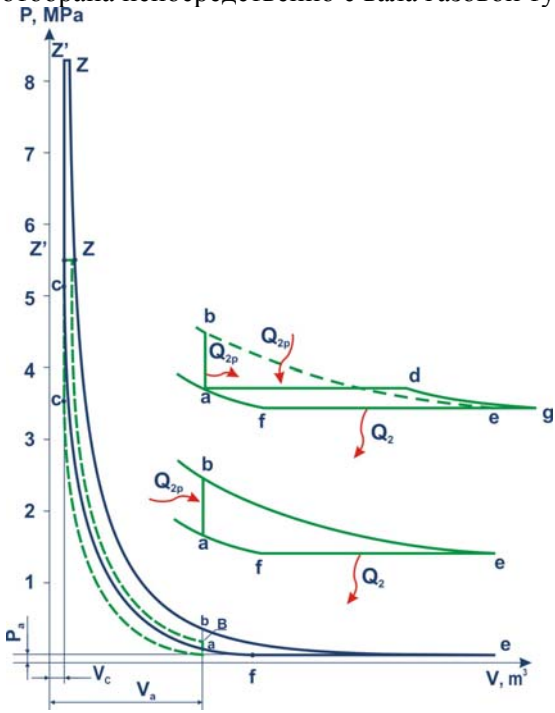

Рис. 1.10. Термодинамические циклы с наддувом.

Этот случай соответствует комбинированному двигателю, используемому в установках большой мощности.

В автотракторных ДВС цикл газотурбинной установки используется лишь для наддува поршневого двигателя, и избыточная работа цикла поглощается компрессором, повышающим давление газа в точке *a* цикла поршневого ДВС. Сопоставление циклов с наддувом И без наддува (рис. 1.10, *ACZ'ZB)* при тех. же параметрах ε, λ, ρ, *k* показывает, что работа цикла, а следовательно, и его среднее давление, в наддувном

варианте получаются существенно выше при одном и том же размере цилиндра. Если указанные параметры цикла остаются одинаковыми в наддувном и безнаддувном вариантах, термический к.п.д. остается одним и тем же.

Показанный на рисунке 1.10, *а* цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном объеме соответствует импульсному режиму работы газовой турбины, что трудно реализовать для ДВС, работающего в широком диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения. Более простым в реализации и лучше приспособленным к условиям работы транспортных ДВС является цикл работы газотурбинного агрегата с подводом теплоты при постоянном давлении **(рис.** 1.10,б).

Как и в предыдущем случае полагаем, что вся теплота $Q_{2п}$, отводимая от поршневого ДВС, без потерь подается в газовую турбину. При этом площадь фигуры *adgf,* эквивалентная работе газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении, меньше площади фигуры *abef,* принадлежащей ранее рассмотренному циклу.

Это свидетельствует о том, что при неизменном количестве сообщаемой рабочему телу теплоты данный турбонаддувный агрегат имеет более низкие энергетические возможности для привода компрессора и обеспечивает меньшее давление наддува поршневого ДВС. Как и в предыдущем случае, термический к.п.д. цикла с наддувом остается тем же, что и без наддува при неизменных параметрах $\varepsilon, \lambda, \rho, k, \pi$.

Из рисунка 1.10 видно, что применение наддува вызывает повышение давления газа в цикле; это свидетельствует об увеличении механической напряженности детален. В расчетах принято, что исходная температура T_a остается неизменной для наддувного и безнаддувного циклов. Практически же сжатие газа в компрессоре сопровождается интенсивным ростом температуры газа, что приводит к существенному возрастанию максимальной и средней температур рабочего тела в цикле, т.е. к соответствующему увеличению тепловых нагрузок на детали ДВС. Поэтому применение наддува требует мер по обеспечению работоспособности деталей ДВС.

Наддув в ДВС с искровым зажиганием пока не получил сколько-нибудь заметного применения, поэтому соответствующий теоретический цикл с наддувом не рассматривается. Однако общие положения и выводы по наддувному циклу со смешанным подводом теплоты в равной мере применимы и для термодинамического цикла ДВС с искровым зажиганием. Отметим лишь, что энергетические возможности для наддува ДВС в этом случае заметно выше, чем у дизелей за счет большей энергии отработавших газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные двигатели/Под. ред. М С. Ховаха.- М.: 1977, 591 с.
2. Багиров Д. Д., Златопольский А. В. Двигатели внутреннего сгорания строительных и дорожных машин.—М.: 1974, 214 с.
3. Воинов А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях — М.: 1977, 277с.
4. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей /Под ред. А. С. Орлина. и М. Г. Круглова.— М.: 1980, 238 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова — М.: 1983, 375 с.
6. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. —М.: 1985, 456 с.
7. Двигатели внутреннего сгорания /Под ред. В.И. Луканина. — М.: 1985, 311 с.
8. Ждановский Н. С., Николаенко А. В, Надежность и долговечность автотракторных двигателей.—Л.: 1974, 223 с.
9. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания.—М.: 1981, 200 с.
10. Кадыров С. М. Долговечность автотракторных дизелей в условиях Средней Азии,—Ташкент: 1982, 270 с.
11. Лурье В. А., Мангушев В. А., Маркова И. В. Итоги науки и техники / Двигатели внутреннего сгорания. Т. 3.—М.: 1982, 232 с.
12. Лурье В. А., Мангушев В. А., Маркова И. В., Черняк Б. Я. Итоги науки и техники / Автомобильные двигатели. Т. 4.— М.: 1985, 264 с.
13. М а х а л д и а н и В. В. О двигателях для горных автомобилей и тракторов.—Тбилиси, 1968. 240 с.
14. Подача и распыливание топлива в дизелях/Под ред. И.В. Астахова — М., 1972, 357 с.
15. Ленин И. М., Малашкин О. М., Самоль Г. И., Костро.в А. В. Системы топливоподачи автомобильных и тракторных двигателей.— М., 1976. 287 с.
16. Стефановский Б.С., Доколин Ю.М., Сорокин В.П., Васильев В.А., Корси Е.К., Скобцов Е.А. Испытания двигателей внутреннего сгорания.—М., 1972. 367 с.
17. Теория двигателей внутреннего сгорания /Под ред. Н.Х. Дьяченко.— Л., 1974. 551 с.

18. Филиппов А, 3. Токсичность отработавших газов тепловых двигателей.—Киев, 1980. 159 с.
19. Ханин Н. С., Озимов П. Л., Кригер В. А., Ванин В. К. Тенденции развития зарубежных дизельных двигателей для большегрузных автомобилей.—М., 1977, 118 с.
20. Чернышев Г. Д., Малышев А. А., Ханин Н. С. Повышение надежности дизелей ЯМЗ и автомобилей КрАЗ.—М., 1974. 288 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение..... 3

Глава 1. **Термодинамические циклы двигателей внутреннего сгорания……..** 17

1.1. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме 18

1.2. Цикл со смешанным подводом теплоты..... 23

1.3. Циклы ДВС с наддувом..... 28

Глава 2. **Действительные циклы автотракторных ДВС.....** 33

Глава 3. **Топлива, горючие смеси, продукты сгорания ....** 46

3.1. Требования к топливам для ДВС..... 46

3.2. Общие свойства топлив..... 46

3.3. Виды топлив..... 49

3.4. Окисление компонентов топлив..... 55

3.5. Коэффициент избытка воздуха..... 58

3.6. Удельное количество свежего заряда 59

3.7. Удельное количество продуктов сгорания..... 60

3.8. Химический коэффициент молекулярного изменения .. 63

3.9. Теплота сгорания топлива и горючей смеси 66

Глава 4. **Процессы газообмена.....** 69

4.1. Выпуск отработавших газов 69

4.2. Наполнение цилиндра.....…… 73

4.3. Организация направленного движения свежего заряда 95

Глава 5. **Процесс сжатия.....** 97

5.1. Общие сведения..... 97

5.2. Влияние различных факторов на n_1..... 100

Глава 6. **Процесс смесеобразования .....** 103

6.1. Смесеобразование в ДВС с искровым зажиганием 104

6.2. Смесеобразование в дизелях..... 106

Глава 7. **Процесс сгорания.....** 136

7.1. Общие сведения..... 136

7.2. Сгорание в ДВС с искровым зажиганием..... 147

7.3. Сгорание в дизелях..... 169

7.4. Тепловыделение в ДВС…… 188

7.5. Расчет параметров газа в конце сгорания 193

Глава 8. **Процесс расширения .....** 198

Глава 9. **Технико-экономические показатели рабочего цикла и двигателя в целом.....** 203

9.1. Индикаторные показатели..... 203

9.2. Внутренние потери..... 221

9.3. Эффективные и оценочные показатели..... 232

***Глава 10.* Системы питания топливом.....** 252
10.1. Системы питания ДВС с искровым зажиганием, работающих на жидком топливе..... 252
10.2. Топливная система дизелей..... 280
10.3. Топливные системы газовых ДВС..... 310
***Глава 11.* Экологические показатели работы ДВС.....** 315
11.1. Выброс токсичных веществ..... 315
11.2. Шумность работы ДВС..... 349
***Глава 12.* Характеристики ДВС, регулирование частоты вращения …….....** 360
12.1. Общие сведения..... 360
12.2. Нагрузочные характеристики..... 361
12.3. Скоростные характеристики..... 365
12.4. Прочие характеристики..... 371
12.5. Устойчивость работы ДВС..... 376
12.6. Регуляторы частоты вращения..... 381
12.7. Регуляторные характеристики..... 389
***Глава 13.* Наддув.....**..... 392
13.1. Общие сведения..... 392
13.2. Системы наддува..... 394
13.3. Особенности работы и рабочего процесса ДВС..... 406
13.4. Промежуточное охлаждение свежего заряда..... 409
13.5. Особенности показателей работы и характеристик ДВС 412
13.6. Показатели ДВС с наддувом в специфических условиях эксплуатации…….. 419
***Глава 14.* Тепловой баланс ДВС и тепловая напряженность его деталей……** 426
14.1. Тепловой баланс..... 426
14.2. Тепловая напряженность деталей 432
***Глава 15.* Динамика ДВС**..... 445
15.1. Общие сведения..... 445
15.2. Кинематика движения поршня..... 446
15.3. Динамика кривошипно-шатунного механизма..... 451
15.4. Равномерность хода ДВС..... 465
15.5. Уравновешивание ДВС..... 466
***Глава 16.* Система смазки.**..... 478
16.1. Общие сведения..... 478
16.2. Условия смазки деталей ДВС..... 481
16.3. Свойства моторных масел..... 486
16.4. Компоненты системы смазки..... 490
16.5. Особенности работы системы смазки в условиях жаркого 495

климата……
***Глава 17.* Система охлаждения.....…..... 499**
17.1. Общие сведения …..... 499
17.2. Система жидкостного охлаждения..... 501
17.3. Элементы системы жидкостного охлаждения..... 508
17.4. Система воздушного охлаждения..... 514
17.5. Работа системы охлаждения в условиях жаркого климата… 518
***Глава 18.* Система подачи воздуха..... 522**
18.1. Общие сведения 522
18.2. Воздухоочистители 525
18.3. Особенности работы системы подачи воздуха в условиях высокой запыленности воздуха ……..… 529
***Глава 19.* Надежность и долговечность..... 531**
19.1. Общие сведения 535
19.2. Основные понятия надежности..... 532
19.3. Долговечность..... 534
19.4. Безотказность..... 549
19.5. Износы, долговечность и безотказность в условиях жаркого климата и высокой запыленности……. 550
***Глава 20.* Общая характеристика и перспективы развития двигателей…….. 556**
20.1. Особенности работы автомобильных и тракторных двигателей…… 556
20.2 Общая характеристика современных ДВС..... 575
20.3. Тенденции и перспективы развития двигателей..... 585
20.4. Газотурбинные двигатели..... 600
Приложения..... 607
Литература..... 612

All rights reserved. This book or any portion thereof may not be reproduced or used in any manner whatsoever without the express written permission of the publisher except for the use of brief quotations in a book review.

Все права защищены. Эта книга или любая ее часть не может быть воспроизведена или использована любым другим способом без письменного разрешения издателя исключая использование цитат из книг или иного способа предусмотренного законодательством.

«Strelbytskyy Multimedia Publishing»

Saksaganskogo str., 58, office 8
Kiev, Ukraine, 01033

tel. +38044 331-06-20
e-mail: ds@strelbooks.com

«Мультимедийное издательство Стрельбицкого»

ул. Саксаганского, 58, оф.8
Киев, Украина, 01033

тел. +38044 331-06-20
e-mail: ds@strelbooks.com

Электронная книга издана
«Мультимедийным издательством Стрельбицкого»

С нашими изданиями электронных книг вы можете ознакомиться на сайтах:

www.andronum.com **www.strelbooks.com**

Желаем приятного чтения!
Свои замечания и предложения направляйте на e-mail: dmytro.strelb@gmail.com

Эта книга охраняется авторским правом
Copyright © 2017
«Мультимедийное издательство Стрельбицкого»