

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)



Г.Г. ТЕР-МКРТИЧЬЯН

**ДВИГАТЕЛИ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
С НЕТРАДИЦИОННЫМИ
РАБОЧИМИ ЦИКЛАМИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(МАДИ)

Г.Г. ТЕР-МКРТИЧЬЯН

ДВИГАТЕЛИ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
С НЕТРАДИЦИОННЫМИ
РАБОЧИМИ ЦИКЛАМИ

Утверждено
в качестве учебного пособия
редсоветом МАДИ

МОСКВА
МАДИ
2015

УДК 621.43
ББК 31.365
Т352

Рецензенты:

д-р техн. наук, зав. отделом центра «Энергоустановки»
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» Козлов А.В.;
д-р техн. наук, проф., ведущий эксперт
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» Каменев В.Ф.

Тер-Мкртичьян, Г.Г.

Т352 Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами: учеб. пособие / Г.Г. Тер-Мкртичьян. – М.: МАДИ, 2015. – 80 с.

ISBN 978-5-7962-0202-9

В учебном пособии рассматриваются вопросы создания двигателей внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами и преобразующие механизмы для реализации таких циклов. Описан траверсный силовой механизм НАМИ, позволяющий управлять движением поршней, изменяя степень сжатия и рабочий объем. Показано, что управление тактами и рабочими циклами позволяет осуществлять альтернативные рабочие процессы, такие как управляемое самовоспламенение смеси и частично гомогенный процесс сгорания.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности 140501 «Двигатели внутреннего сгорания», а также может быть полезно аспирантам, инженерам и научным работникам, занимающимся проектированием и исследованиями ДВС нетрадиционных конструкций.

УДК 621.43
ББК 31.365

ISBN 978-5-7962-0202-9

© МАДИ, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Анализ перспектив развития двигателестроения свидетельствует о том, что в обозримом будущем поршневые двигатели внутреннего сгорания сохранят свое доминирующее положение в традиционных отраслях их применения (автомобильный и железнодорожный транспорт, сельскохозяйственное машиностроение, судостроение) при одновременном расширении их использования в транспортных средствах специального назначения.

Поршневые двигатели постоянно совершенствуются в первую очередь по экологическим и экономическим показателям, определяемым совершенством рабочего процесса. Однако в последние годы наметилась тенденция к снижению темпов улучшения этих показателей.

Улучшение показателей рабочего процесса ДВС осуществляется за счет развития гибко управляемых систем топливоподачи и воздухообеспечения. При этом схема реализации рабочего процесса базируется на традиционных двух или четырехтактных циклах, практически не претерпевших изменений за более чем столетнюю историю развития ДВС.

Совершенствование традиционных циклов уже оказывается недостаточно эффективным и могут быть востребованы нетрадиционные модифицированные рабочие циклы ДВС.

1. НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС

При описании циклов используются следующие термины и определения.

Рабочим циклом ДВС называют периодически повторяющийся ряд последовательных процессов, протекающих в цилиндре двигателя и обуславливающих превращение тепловой (химической) энергии в механическую работу.

Такт (ход поршня) – часть рабочего цикла (совокупность процессов) происходящая в цилиндре, осуществляемая в интервале перемещения поршня между двумя смежными мертвыми точками (ВМТ и НМТ).

Свежий заряд – смесь топлива и окислителя, поступившая в цилиндр.

Рабочее тело – газы, с помощью которых в цилиндре осуществляется преобразование тепловой энергии в механическую работу.

Выпускные газы – газы, удаляемые из цилиндра ДВС после завершения рабочего цикла.

В традиционном цикле присутствуют следующие такты: впуск; сжатие; рабочий ход, состоящий из процессов сгорания и расширения рабочего тела; выпуск – удаление выпускных газов из цилиндра в атмосферу, или в турбину турбокомпрессора.

С целью совершенствования рабочих процессов и получения новых качеств предлагались и предлагаются отличные от классических модифицированные циклы ДВС.

На рисунке 1.1 дана классификация модифицированных рабочих циклов ДВС.

Модифицированные рабочие циклы могут состоять из комбинации нескольких элементарных циклов, отличающихся тактами,

или используемым рабочим телом. Элементарный цикл начинается с такта впуска и завершается тактом выпуска. Комбинированный цикл, например, состоящий из четырехтактного и двухтактного циклов обозначается как **4+2**.

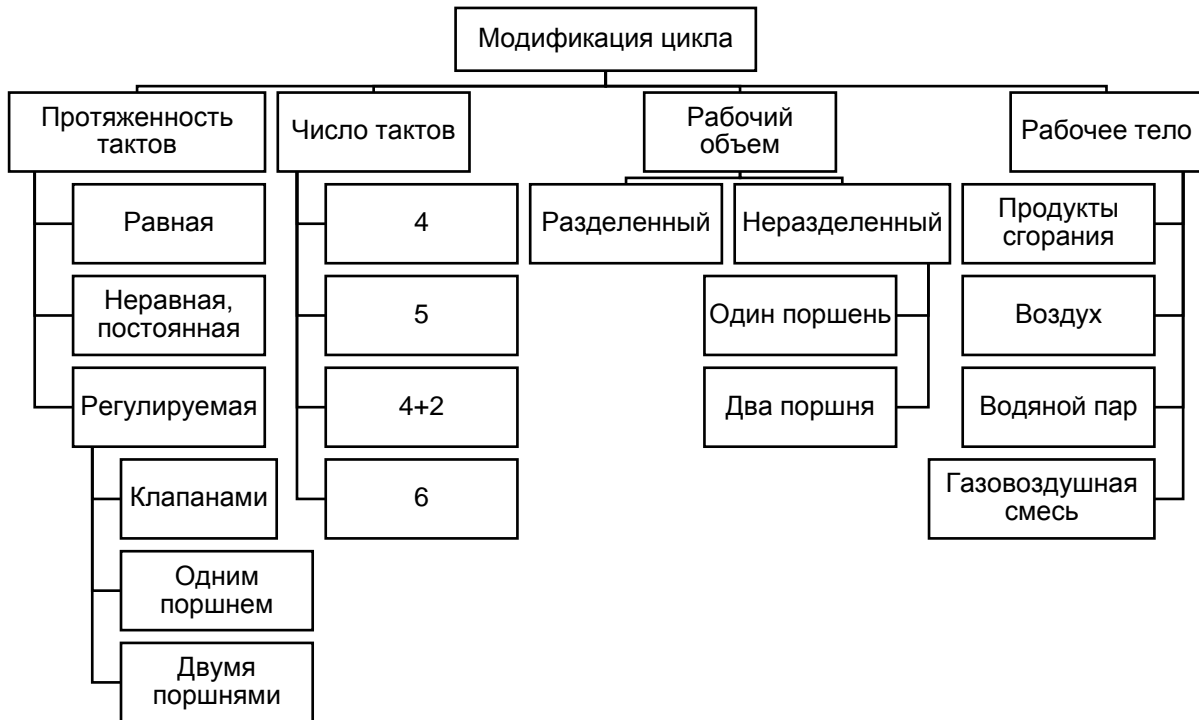


Рис. 1.1. Классификация модифицированных рабочих циклов ДВС

В двигателях с модифицированным рабочим циклом такты могут совместно осуществляться не в одном, а в двух, или более цилиндрах. Поэтому **тактом** будем называть часть рабочего цикла при изменении объема модуля¹ от минимального до максимального значения. Такты могут быть равной и неравной протяженности.

В двигателях с модифицированным циклом **рабочим телом**, кроме продуктов сгорания, также могут являться пар, смесь пара с продуктами сгорания, сжатый воздух.

В модифицированном цикле могут присутствовать процессы и такты, отличные от традиционных, или являющиеся их разновидностью.

¹Модуль – двигатель с минимальным количеством цилиндров, необходимым для совершения рабочего цикла.

Вытеснение – удаление выпускных газов или воздуха из одного цилиндра в другой цилиндр двигателя с целью дополнительного расширения.

Расширение – рабочий ход, в котором имеется процесс расширения, но отсутствует процесс сгорания².

Сгорание – так будем называть традиционный рабочий ход с процессами сгорания и расширения, чтобы отличить его от такта **Расширение**.

Изохорное сгорание – сгорание в камере постоянного объема.

Нагнетание – сжатие рабочего тела (как правило воздуха) в одном цилиндре и его перемещение в воздушный ресивер, или использование для наддува другого цилиндра.

На рисунке 1.2 представлены основные направления и методы модифицирования рабочего цикла ДВС.



Рис. 1.2. Направления и методы модифицирования рабочего цикла

Рассмотрим более подробно примеры модификации цикла ДВС при разделении тактов между его рабочими объемами – двигатели с разделенным циклом и двигатели с добавленными тактами.

² Встречаются следующие определения рабочего хода:
топливный рабочий ход – сгорание топлива и расширение газов;
воздушный рабочий ход – расширение воздуха;
паровой рабочий ход – расширение пара.

2. ДВИГАТЕЛИ С РАЗДЕЛЕННЫМИ ТАКТАМИ

Двигателями с разделенными тактами будем называть такие, в которых такты рабочего цикла (впуск – сжатие – расширение – выпуск) осуществляются в разных цилиндрах, как правило, в двух. При этом двигатель состоит из двухцилиндровых модулей. Полный рабочий цикл происходит, как правило, за один оборот коленчатого вала, хотя двигатель является четырехтактным.

В традиционном четырехтактном двигателе рабочий цикл осуществляется в одном цилиндре за два оборота коленчатого вала, а в двигателе с разделенным в пространстве циклом рабочий процесс осуществляется в двух цилиндрах за один оборот коленчатого вала. Поэтому при прочих равных условиях литровая мощность двигателей с традиционным и разделенным циклами одинакова.

При реализации рабочего цикла по классической схеме процессы сгорания и расширения осуществляются в течение одного такта – рабочий ход. Они не разделены в пространстве (происходят в одном цилиндре) и слабо разделены во времени.

Топливо-воздушной смеси не хватает времени для полноценного сгорания. Для качественного смесеобразования в дизеле времени так же недостаточно. При частоте вращения коленчатого вала 4800 мин^{-1} (80 с^{-1}), характерной для высокооборотных дизелей легковых автомобилей четыре такта (два оборота коленчатого вала) происходят за $2/80 = 0,025 \text{ с}$ (25 мс). Смесеобразование осуществляется приблизительно за 20° поворота коленчатого вала или за $20/360 \times 80 \approx 0,0007 \text{ с} \approx 0,7 \text{ мс}$. При частоте вращения коленчатого вала $350 \dots 550 \text{ мин}^{-1}$, характерной для среднеоборотных судовых дизелей на смесеобразование отводится на порядок больше време-

ни 6...10 мс, что определяет существенно более высокий уровень индикаторного КПД у дизелей этого класса.

Другим обстоятельством, негативно влияющим на процесс сгорания, является уменьшение объема надпоршневого пространства при движении поршня вниз после прохождения ВМТ. При этом по мере распространения фронта пламени давление и температура рабочего тела уменьшаются, а площади охлаждающих поверхностей и, соответственно, потери теплоты увеличиваются. Это приводит к снижению эффективности процесса сгорания и увеличению образования продуктов неполного сгорания CO и CH.

Для устранения указанных недостатков предложен ряд конструктивных решений, в которых предусмотрено полное или частичное разделение рабочего хода на такты сгорания и расширения [1, 2].

Кроме того, разделение тактов по разным цилиндрам добавляет традиционному циклу ДВС дополнительные положительные качества. Например, увеличив размеры одного из цилиндров, можно обеспечить продолженное расширение рабочего тела.

Концепция разделенного цикла не нова. Еще в 1891 г. американская компания *Backus Water Motor Company* выпускала такие двигатели малыми сериями, но они не получили распространения (рис. 2.1) [3].

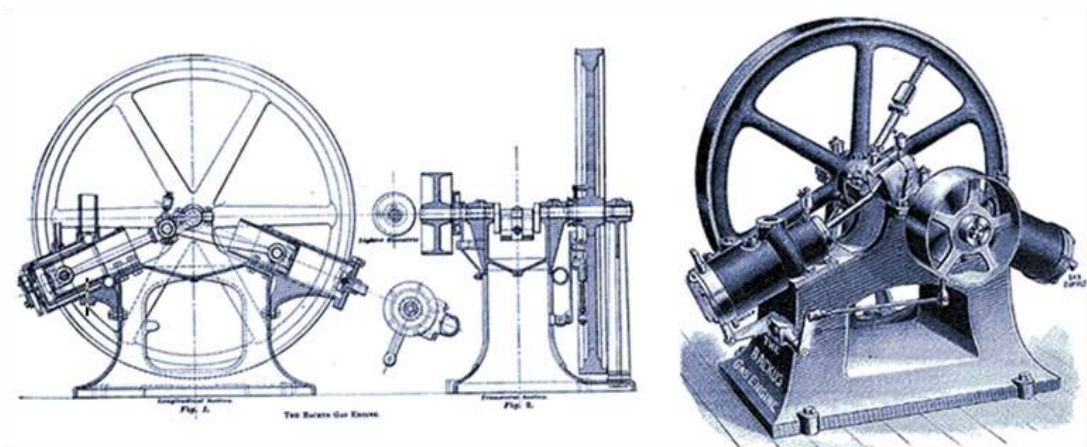


Рис. 2.1. Двигатель *Backus Water Motor Company*

Двигатель Кушуля

В 60-х годах XX столетия профессор Ленинградского института авиационного приборостроения В.М. Кушуль предложил двигатель, в котором попарно расположенные цилиндры сообщаются между собой через короткий тангенциальный канал, выполненный в головке [4]. Движение поршней происходит с некоторым сдвигом по фазе. Поршень второго цилиндра отстает на $22\text{--}24^\circ$ по углу поворота коленчатого вала от поршня первого, что достигается особым расположением цапфы прицепного шатуна (рис. 2.2).

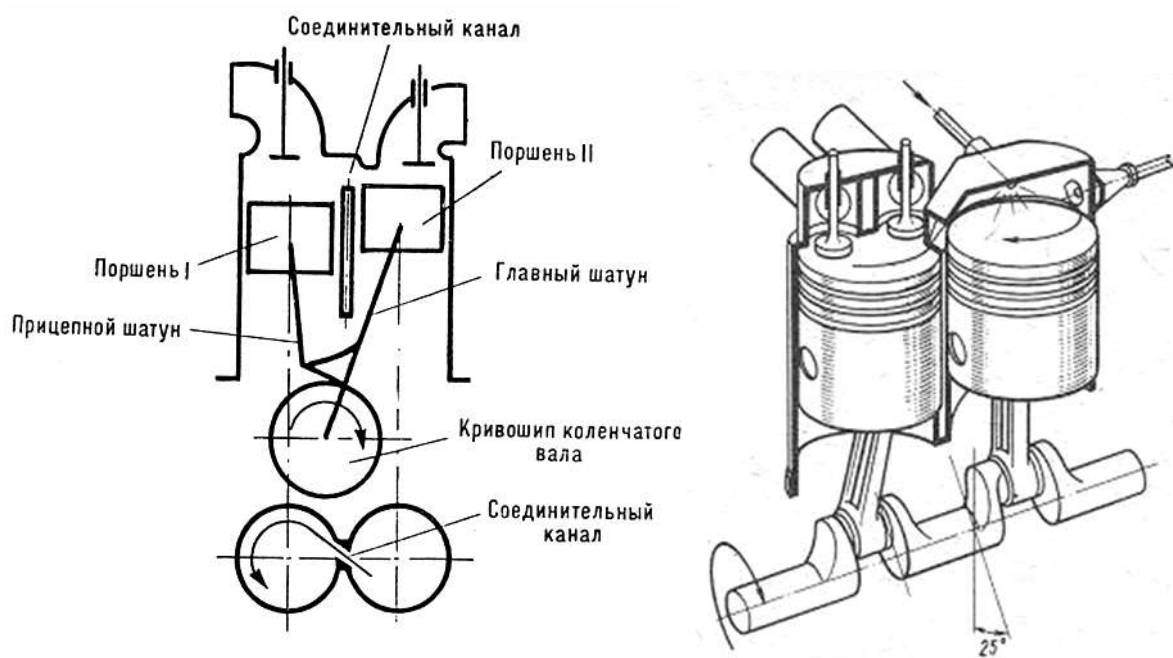


Рис. 2.2. Двигатель В.М. Кушуля

Степень сжатия в первом цилиндре равна 7, как в двигателях с искровым воспламенением, а во втором – 21. При этом общая для блока из двух цилиндров степень сжатия равна 10.

Двигатель работает следующим образом. На такте впуска первый цилиндр через соответствующий канал с клапаном заполняется обогащенной топливовоздушной смесью, а во второй через свой впускной клапан поступает чистый воздух. На такте сжатия значи-

тельная часть воздушного заряда из второго цилиндра перетекает в первый цилиндр.

Воспламенение смеси в первом цилиндре осуществляется от электрической искры за $10\text{--}12^\circ$ до ВМТ. После воспламенения и начала первой фазы сгорания заряда в первом цилиндре, поршень во втором цилиндре еще продолжает движение к ВМТ. Угол отставания в движении поршня второго цилиндра выбран таким, что за первую фазу процесса сгорания – до прихода поршня первого цилиндра в ВМТ – повышение давления от сжатия во втором цилиндре было бы равно увеличению давления от сгорания в первом цилиндре, или незначительно превосходило его.

Следовательно, в первой фазе процесса сгорания, не смотря на то, что цилиндры сообщены между собой, в каждом из них независимо происходят различные процессы: в первом – сгорание, а во втором – сжатие (с возможным незначительным перетеканием сжатого воздуха в первый цилиндр).

Когда же поршень первого цилиндра проходит ВМТ и сгорание с участием собственного воздушного заряда в основном заканчивается, давление сжатия во втором цилиндре начинает превышать давление сгорания и наступает вторая фаза процесса сгорания с поступлением сжатого до высокого давления воздуха из второго в первый цилиндр.

К моменту окончания перетекания сжатого воздуха, когда второй поршень достигает ВМТ, процесс сгорания полностью заканчивается и начинается одновременное расширение в первом и втором цилиндрах. В конце процесса расширения в обоих цилиндрах открываются выпускные каналы и при следующем такте газы выталакиваются из цилиндров.

Не смотря на достаточно успешные испытания опытных образцов, двигатель В.М. Кушуля не нашел промышленного применения вследствие значительного усложнения конструкции.

Двигатель Скудери

В последние годы наиболее активно разрабатывает концепцию разделенного цикла фирма *Scuderi Group* (США) изобретателя К. Скудери, предложившего термин *Split-Cycle Combustion* (SCC) [5]. В 2009 г. на Всемирном конгрессе SAE в Детройте был представлен действующий прототип двигателя Скудери.

В двигателе Скудери один цилиндр предназначен для впуска и сжатия, а другой – для расширения (рабочего хода) и выпуска отработавших газов. Цилиндры соединяются между собой перепускным каналом с клапаным механизмом, по которому сжатая топливовоздушная смесь поступает в рабочий цилиндр (рис. 2.3).

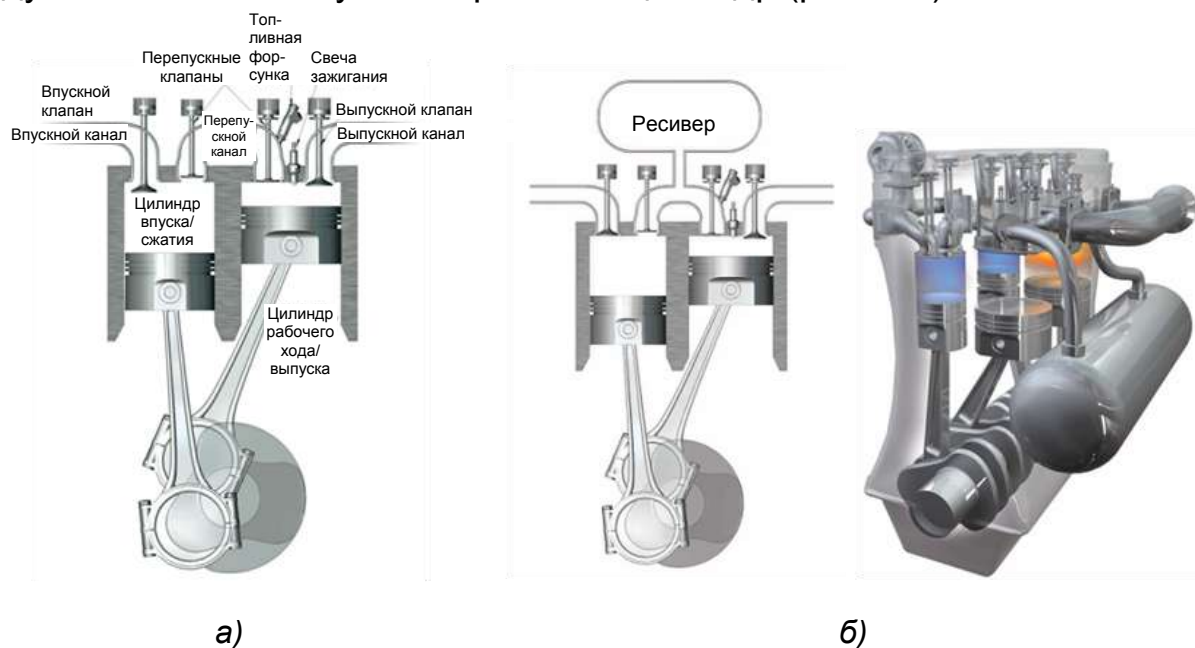


Рис. 2.3. Двигатель Скудери: а) схема двигателя; б) двигатель с ресивером

Поршни в параллельных цилиндрах движутся с небольшим смещением по фазе (ориентировочно, около 30°), обеспечивая последовательное, но почти одновременное протекание двух тактов.

Когда в первом цилиндре (компрессорном) осуществляется впуск или сжатие, во втором цилиндре, соответственно, происходит расширение или выпуск. Двигатель Скудери может состоять из нескольких пар цилиндров.

Воспламенение смеси происходит после ВМТ. При этом поршень в первом цилиндре движется вверх, а поршень во втором (рабочем) цилиндре – вниз. Процесс сгорания осуществляется при слабо меняющемся объеме цилиндров, что должно способствовать повышению индикаторного КПД.

Двигатель Скудери может быть дополнен воздушным ресивером. В этом случае возможны несколько режимов работы двигателя.

Обычный режим, при котором в компрессорном цилиндре осуществляются такты впуска и сжатия, а в рабочем цилиндре – рабочий ход и выпуск. Воздушный ресивер отключен.

Режим компрессора. Рабочий цилиндр отключен, а компрессорный цилиндр нагнетает воздух в ресивер, аккумулируя энергию торможения автомобиля, которая используется впоследствии для совершения полезной работы.

Экономичный режим. Компрессорный цилиндр отключен. Сжатый воздух из ресивера поступает в рабочий цилиндр, в который также подается топливо. Повышение КПД цикла происходит из-за отсутствия затрат энергии на сжатие рабочего тела.

Эспандерный режим. Компрессорный цилиндр отключен. Подача топлива в рабочий цилиндр отсутствует. Сжатый воздух из ресивера поступает в рабочий цилиндр, расширяясь в котором, совершает полезную работу за счет рекуперации энергии торможения.

Двигатель *ZajacMotors*

В инжиниринговой фирме *Zajac Motors* (США) разработан двигатель с разделенным рабочим циклом, принцип работы которого

также весьма близок к организации рабочего процесса в двигателе Скудери [6]. Сжатие воздушного заряда производится в одном цилиндре, а расширение – в другом (рис. 2.4). Двигатель оснащен внешней камерой сгорания, работающей по принципу, названному разработчиками «горячая стенка», в которую поступают топливо и воздух, сжатый в первом цилиндре. Форма камеры сгорания, принцип работы, дизайн и материалы для изготовления защищены патентами. Конструкция двигателя предусматривает использование элементов газораспределения вращающегося типа.

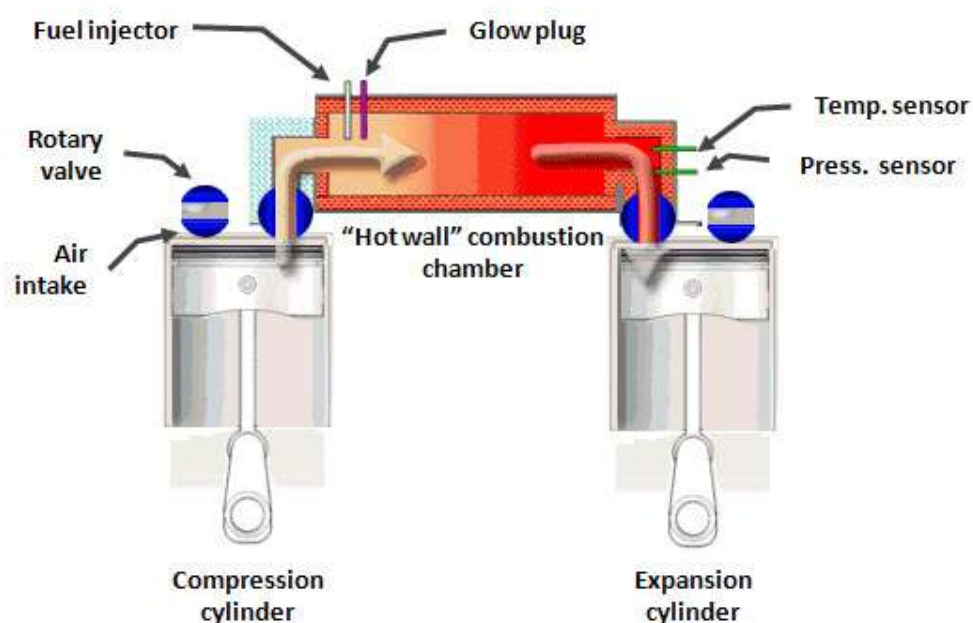


Рис. 2.4. Схема двигателя ZajacMotors

Двигатель *TourEngine*

Схема двигателя, разработанного Х. Туром (*TourEngineInc.*, США) [7], близка к схеме двигателя Скудери. Модуль двигателя *TourEngine* состоит из двух oppositely расположенных цилиндров со смещенными осями и двух коленчатых валов. Внутренние полости компрессорного цилиндра, называемого «холодным» и рабочего цилиндра, называемого «горячим», сообщаются друг с другом коротким соединительным каналом, перекрываемым клапаном (рис. 2.5).

Рабочий объем «холодного» цилиндра 95 см^3 в два раза меньше, чем у «горячего» цилиндра 190 см^3 . Соответственно степень сжатия в «холодном» цилиндре, равная 8, в два раза меньше степени расширения в «горячем» цилиндре, равной 16, что позволяет обеспечить продолженное расширение рабочего тела.

В 2011 г. опытный образец двигателя *TourEngine* экспонировался на различных автомобильных выставках и конференциях.

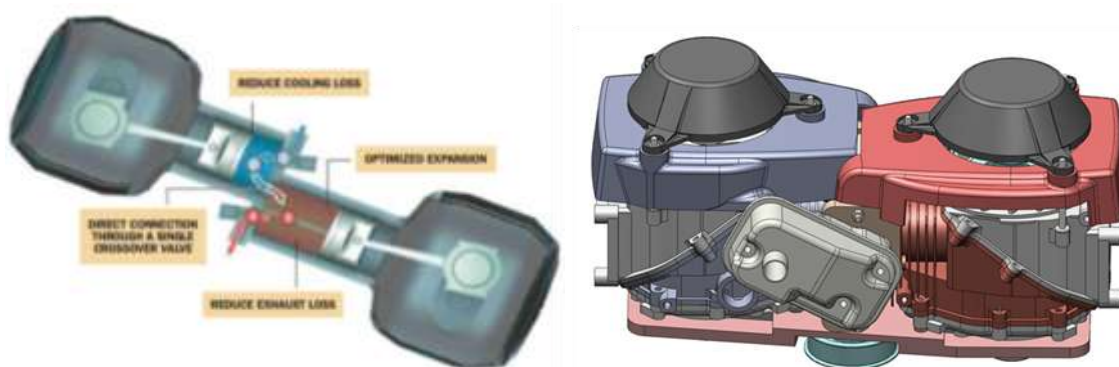


Рис. 2.5. Двигатель *TourEngine*

Разделенный цикл с рабочим процессом НСРС

Группа ученых из университетов Пиза (Италия) и Мэдисон (США) на базе двигателя с разделенным циклом разрабатывают концепцию HomogenousChargeProgressiveCombustion (НСРС), являющуюся разновидностью рабочего процесса с самовоспламенением гомогенной смеси НСН [8]. Как и в других двигателях с разделенными тактами, в двигателе, реализующем процесс НСРС, имеются два цилиндра, в одном из которых (компрессорном) осуществляются впуск и сжатие, а в другом (рабочем) – сгорание, расширение и выпуск. Цилиндры соединены перепускным каналом, в который производится впрыск топлива несколько позже ВМТ поршня рабочего цилиндра. В это время поршень компрессорного цилиндра движется к своей ВМТ, перемещая воздушный заряд через перепускной канал в рабочий цилиндр (рис. 2.6).

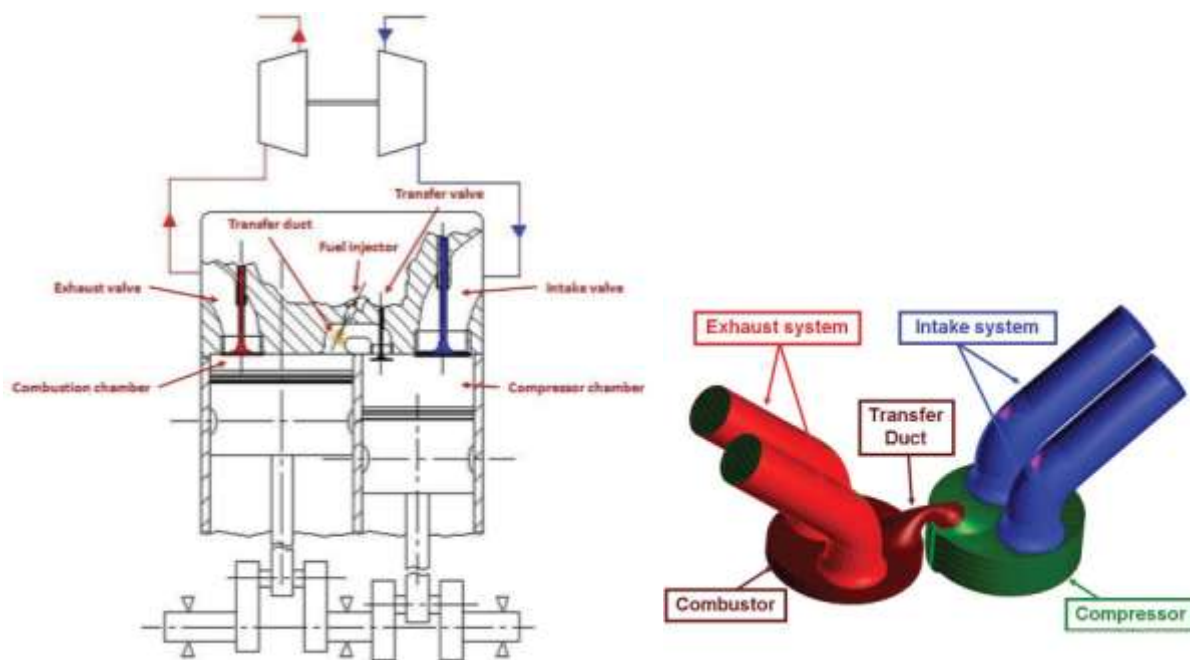


Рис. 2.6. Двигатель с процессом НСРС

Подобранные специальным образом размеры и конфигурация перепускного канала позволяют обеспечить очень высокую скорость перетекания через него воздушного заряда (более 200 м/с) и получение гомогенной топливно-воздушной смеси (рис. 2.6).

Двигатель *DIROKonstruktion*

Наиболее радикально процесс сгорания отделен от других составляющих рабочего цикла в двигателе, предложенном немецкой фирмой фирма *DIROKonstruktion* [9]. В головке цилиндра двигателя *DIRO* размещен вращающийся золотник, содержащий две камеры сгорания, попеременно сообщающиеся с рабочей полостью цилиндра. Камеры сгорания с интервалом в 180° периодически соединяются с рабочей полостью цилиндра в конце такта сжатия и начале такта рабочего хода. Золотник совершает один оборот за четыре оборота коленчатого вала. При этом обеспечивается значительный запас времени для эффективного сгорания топливно-воздушной смеси.

Предложены варианты исполнения двигателя *DIRO*, как с комбинированным клапанно-золотниковым газораспределением, так и с золотниковым газораспределением, при котором впускной и выпускной каналы размещены в том же вращающемся золотнике, что и камеры сгорания (рис. 2.7).

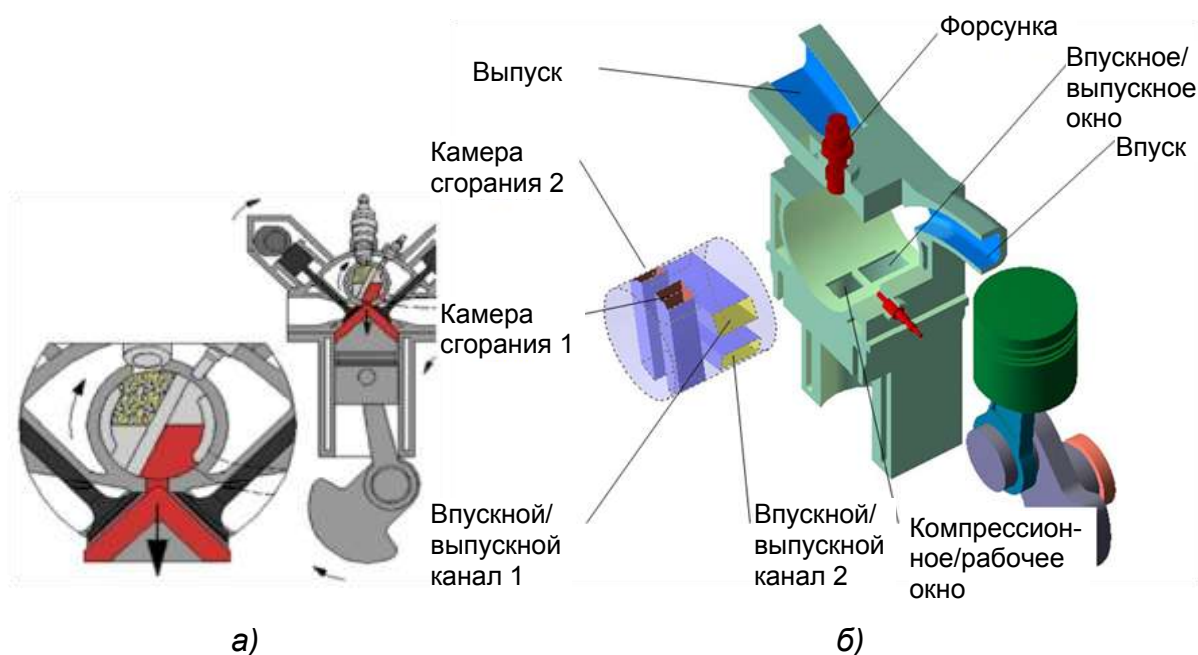


Рис. 2.7. Двигатель *DIRO*:
 а) комбинированное газораспределение;
 б) золотниковое газораспределение

На рисунке 2.8 показаны фазы рабочего цикла двигателя *DIRO* в дизельном варианте.

Во время фазы 1 в цилиндре и в первой камере сгорания осуществляется процесс сжатия, а во второй камере сгорания, отделенной от цилиндра, происходит смесеобразование и сгорание топливно-воздушной смеси. Во время фазы 2 в первой камере сгорания осуществляется впрыск топлива и смесеобразование, а в цилиндре и во второй камере сгорания, которая сообщается с цилиндром, происходит расширение (рабочий ход). На протяжении фаз 3 и 4 рабочего цикла осуществляются такты выпуска и впуска, а первая и вторая камеры сгорания функционально меняются местами.

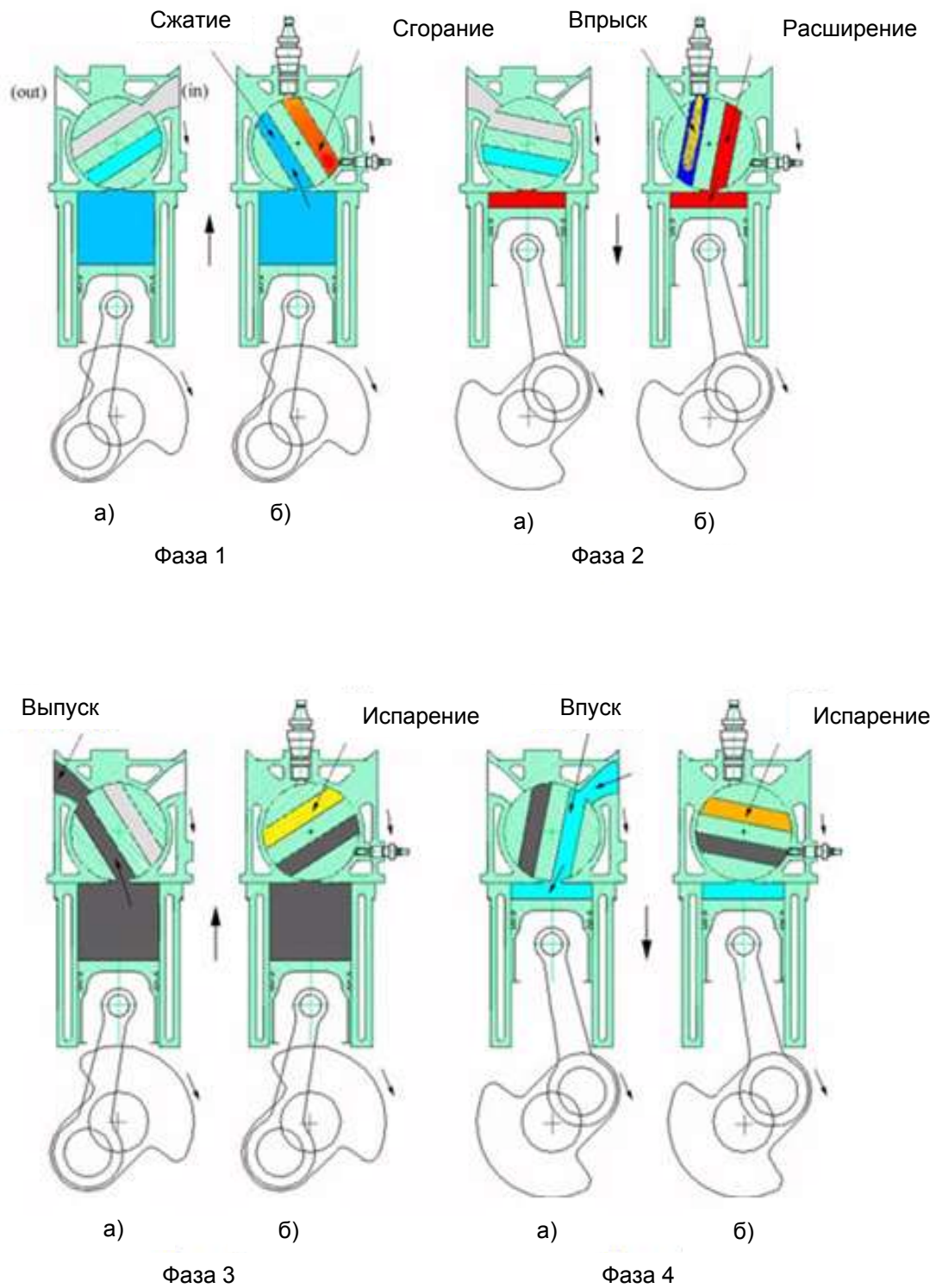


Рис. 2.8. Фазы рабочего цикла двигателя DIPO:
 а) сечение по каналам;
 б) сечение по камерам сгорания

В качестве недостатков схемы двигателя *DIRO* следует отметить существенное усложнение конструкции и повышенные газодинамические потери при перетекании рабочего тела из цилиндра в камеры сгорания и обратно, а также проблемы с уплотнением и смазкой золотника, работающего в зоне высоких тепловых нагрузок.

Обобщая информацию о двигателях с разделенными тактами, можно отметить следующее. Разделение в пространстве тактов рабочего цикла усложняет конструкцию двигателя и, как правило, ухудшает его массогабаритные показатели. Потенциальный выигрыш от разделения процессов сгорания и расширения частично нивелируется дополнительными энергетическими потерями при перетекании газов между полостями, а также потерями теплоты в технических решениях с дополнительными камерами, размещенными в головке цилиндра. По этой причине двигатели с разделенными тактами до настоящего времени не нашли промышленного применения.

Ситуация может измениться в связи с развертыванием в последние годы во всех технически развитых странах масштабных программ, как правило, государственных с участием ведущих автомобильных концернов по разработке новых рабочих процессов, основанных на технологии воспламенения от сжатия однородной смеси, известной как Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI).

Принципиальное отличие процесса HCCI от традиционных рабочих процессов двигателей заключается в организации управляемого одновременного многоочагового воспламенения и горения заряда по всему объему камеры сгорания, а не во фронте пламени гомогенной или гетерогенной среды. В результате скорость тепловыделения значительно возрастает, процесс подвода теплоты к рабочему телу приближается к оптимальному, с термодинамической точки зрения, подводу теплоты при постоянном объеме, что в соче-

тании с высокой степенью сжатия, необходимой для самовоспламенения гомогенной смеси, обеспечивает высокий уровень индикаторного КПД [10].

Разделение тактов рабочего цикла дает потенциальную возможность реализовать в двигателях процесс HCCI, а также значительно упрощает задачу создания многотопливного двигателя, способного одинаково эффективно работать на бензине, природном газе или диметиловом эфире [11]. Разделение тактов может позволить осуществлять и другие альтернативные рабочие процессы, такие, как Controlled AutoIgnition (CAI) – управляемое самовоспламенение смеси, Highly Premixed LateInjection (HPLI) – частично гомогенный процесс сгорания.

3. ДВИГАТЕЛИ С ДОБАВЛЕННЫМИ ТАКТАМИ

Дополнительные такты добавляют к четырем тактам традиционного цикла с целью реализовать продолженное расширение рабочего тела, или обеспечить дополнительный отвод и рекуперацию теплоты от деталей цилиндропоршневой группы.

Модифицированные рабочие циклы могут состоять из комбинации нескольких элементарных циклов, отличающихся тактами, или используемым рабочим телом. Элементарный цикл начинается с такта впуска и завершается тактом выпуска. Комбинированный цикл, например, состоящий из четырехтактного и двухтактного циклов обозначается как 4+2.

В двигателях с модифицированным циклом рабочим телом кроме продуктов сгорания также могут являться пар, смесь пара с продуктами сгорания, сжатый воздух.

На рисунке 3.1 дана классификация модифицированных рабочих циклов ДВС с добавленными тактами.

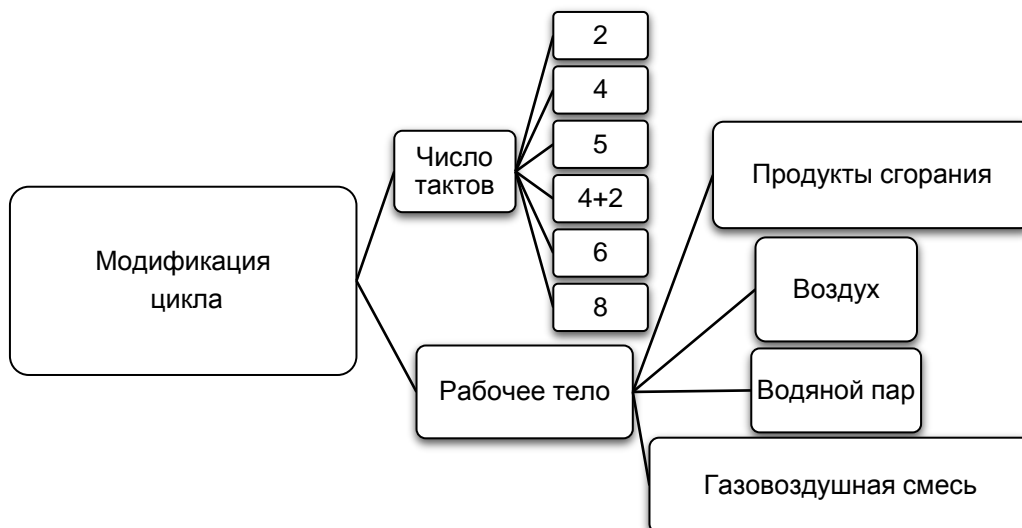


Рис. 3.1. Классификация модифицированных рабочих циклов с добавленными тактами

Рассмотрим более подробно примеры модификации цикла ДВС с дополнительными тактами.

Пятитактный двигатель *ILMOR*

Английская компания *Ilmor Engineering*, известная своими двигателями для гоночных автомобилей, представила на выставке EXPO 2009 в Штутгарте двигатель, названный пятитактным [12]. За основу конструкции двигателя приняты технические решения патента 2003 г. бельгийского изобретателя Герхарда Шмитца (Gerhard Schmitz) [13]. Двигатель имеет добавленный такт рабочего цикла и обеспечивает продолженное расширение. Главной задачей проекта являлось создание бензинового двигателя с высокой удельной мощностью, не уступающего по топливной экономичности дизелям, но лишенного присущего последним недостатка в виде повышенной эмиссии оксидов азота и сажи.

Три цилиндра пятитактного ДВС имеют разный диаметр. Внешние цилиндры высокого давления (ВД) малого диаметра работают по обычному четырехтактному циклу. В среднем цилиндре низкого давления (НД) большого диаметра происходит продолженное расширение газов, которое разработчики и назвали пятым тактом (рис. 3.2). Рабочий объем цилиндра низкого давления составляет 350 см^3 , а рабочий объем цилиндра высокого давления равен 778 см^3 . Геометрическая степень сжатия, она же степень расширения, в цилиндрах высокого давления равна 8, а степень расширения в цилиндре низкого давления равна 30. Общая степень расширения в двигателе составляет 30.

Опытный образец двигателя имеет максимальные мощность и крутящий момент соответственно $96 \text{ кВт}/7000 \text{ мин}^{-1}$ и $166 \text{ Нм}/5000 \text{ мин}^{-1}$. При этом минимальная величина удельного эффективного

расхода топлива равна 226 г/кВт.ч., что значительно ниже, чем у лучших современных аналогов. Давление наддува составляет 0,5 МПа.

Двигатель имеет два распределительных вала. Первый вал, обслуживающий цилиндры высокого давления, совершает один оборот за два оборота коленчатого вала так, как это осуществляется в традиционных четырехтактных ДВС. Второй распределительный вал, обслуживающий цилиндр низкого давления, вращается с частотой, равной частоте вращения коленчатого вала.

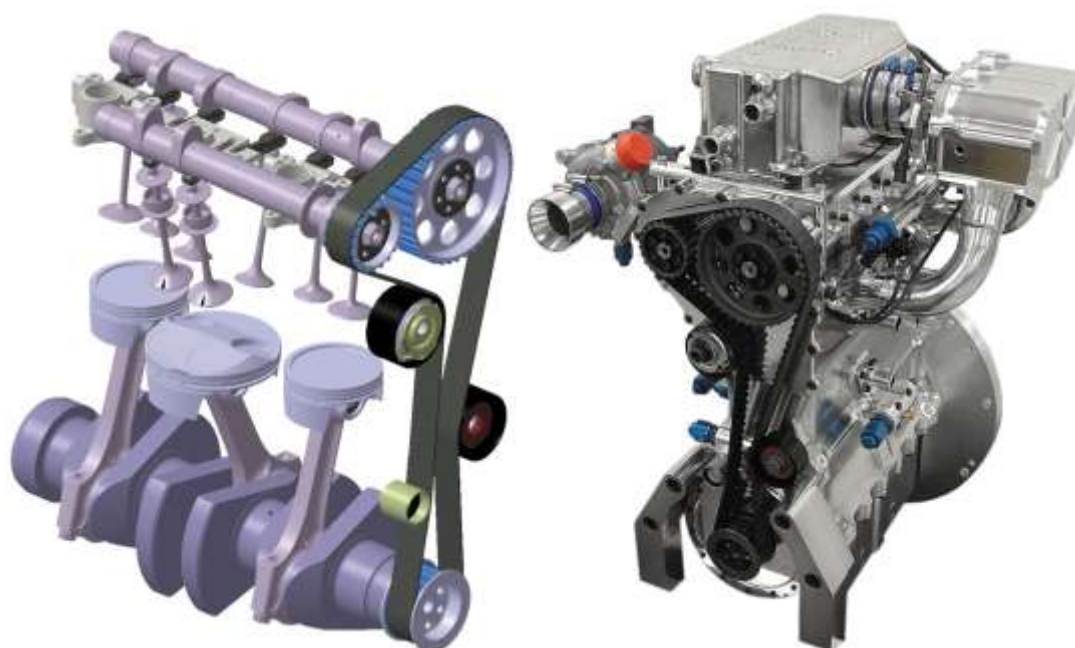


Рис. 3.2. Двигатель ILMOREngineering

Рабочий процесс пятитактного двигателя состоит из четырех фаз (рис. 3.3).

Фаза *А*. Поршни в цилиндрах ВД движутся от ВМТ к НМТ. Поршень в цилиндре НД движется от НМТ к ВМТ. В первом цилиндре ВД осуществляется впуск свежего заряда, а во втором цилиндре ВД – рабочий ход (сгорание и предварительное расширение). В цилиндре НД осуществляется выпуск газов.

Фаза *В*. Поршни в цилиндрах ВД движутся от НМТ к ВМТ. Поршень в цилиндре НД движется от ВМТ к НМТ. В первом цилиндре

ре ВД осуществляется сжатие свежего заряда, а во втором цилиндре ВД – вытеснение выпускных газов в цилиндр НД. В цилиндре НД осуществляется процесс дополнительного расширения выпускных газов из второго цилиндра ВД.

Фаза С. Поршни в цилиндрах ВД движутся от ВМТ к НМТ. Поршень в цилиндре НД движется от НМТ к ВМТ. В первом цилиндре ВД осуществляется рабочий ход (сгорание и предварительное расширение), а во втором цилиндре ВД – впуск свежего заряда. В цилиндре НД осуществляется выпуск газов.

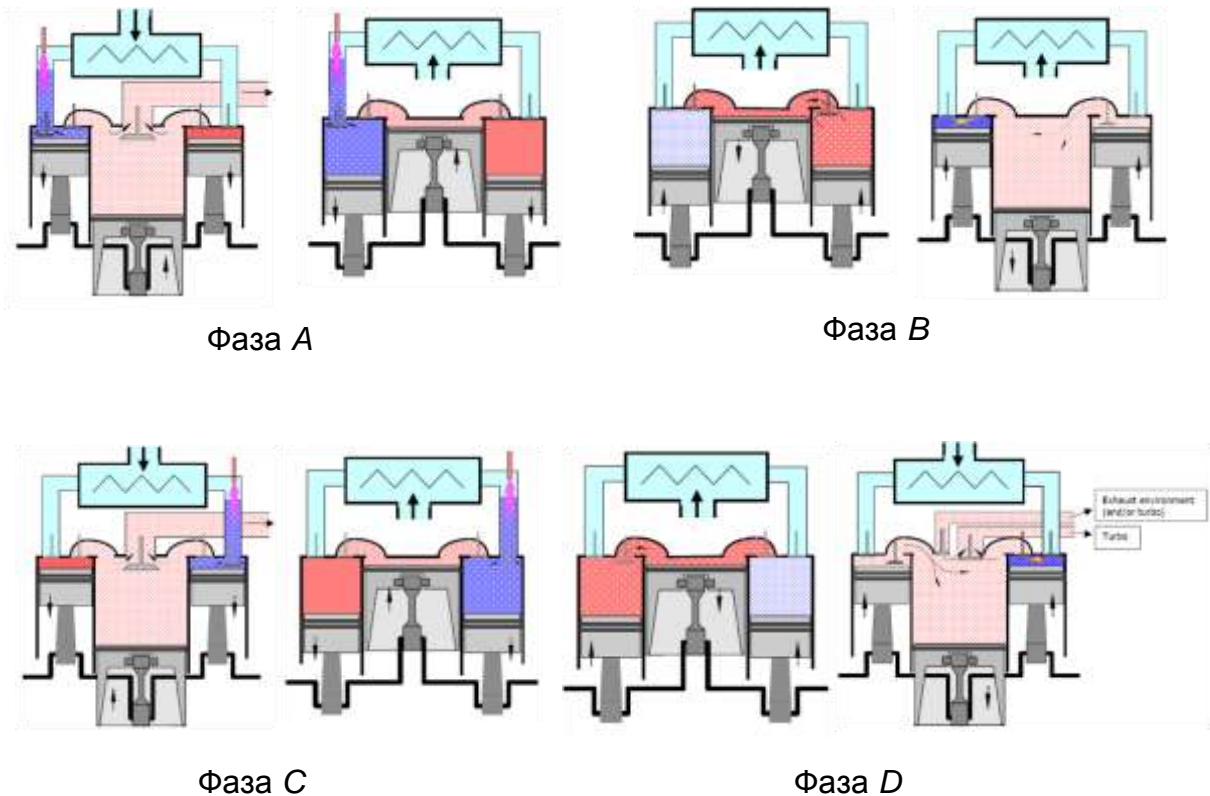


Рис. 3.3. Фазы рабочего процесса пятитактного двигателя

Фаза D аналогична Фазе В, в которой первый и второй цилиндры ВД меняются местами.

Последовательность тактов рабочего цикла дана в табл. 3.1.

Таким образом, рабочий цикл пятитактного двигателя осуществляется за два оборота коленчатого вала и состоит из двух групп про-

цессов. Первая группа включает процессы впуска, сгорания и предварительного расширения в первом или втором цилиндрах ВД и выпуск газов из цилиндра НД. Вторая группа включает процессы сжатия и вытеснения выпускных газов в первом или втором цилиндрах ВД и дополнительное расширение выпускных газов в цилиндре НД.

Таблица 3.1

Последовательность тактов рабочего цикла

Фаза	Цилиндр		
	1(ВД)	2(НД)	3(ВД)
<i>A</i>	Впуск	Выпуск	Рабочий ход
<i>B</i>	Сжатие	Расширение	Вытеснение
<i>C</i>	Рабочий ход	Выпуск	Впуск
<i>D</i>	Вытеснение	Расширение	Сжатие

Необходимо отметить, что первые образцы трехцилиндровых двигателей с внешними цилиндрами малого диаметра, работающими по четырехтактному циклу, и внутренним цилиндром большого диаметра, работающим по двухтактному циклу, были изготовлены еще Н. Отто и Р. Дизелем [14, 15, 16].

Реализация пятитактного цикла в двигателях традиционной конструкции

Существенным недостатком концепции *ILMOR Engineering* является необходимость создания двигателей новой конструкции без унификации с серийными моделями и невозможность построения типоразмерных рядов двигателей.

Продолженное расширение рабочего тела может быть организовано и в серийных двигателях традиционной конструкции с форсированием двигателя с помощью наддува при сокращении числа работающих цилиндров. При этом среднее эффективное давление и, следовательно, механический КПД на характерных режимах экс-

плуатации автомобиля могут быть существенно повышены с сохранением исходной номинальной мощности двигателя.

В выключенных цилиндрах прекращается осуществление традиционного рабочего процесса ДВС, и они переводятся в режим продолженного расширения (эспандерный режим). В современных комбинированных двигателях внутреннего сгорания продолженное расширение продуктов сгорания топлива обычно осуществляют в газовой турбине, мощность которой используют только для привода нагнетателя. Дополнительное расширение продуктов сгорания в цилиндрах будет способствовать повышению эффективности утилизации энергии выпускных газов ДВС [17, 18].

Рассмотрим реализацию рабочего цикла с разделенными тактами и продолженным расширением на примере двигателя ВАЗ 11194 с рабочим объемом 1,4 л, хотя этот цикл может быть реализован в любом четырехтактном четырехцилиндровом двигателе с порядком работы 1-3-4-2. При этом поставим задачу свести к минимуму конструктивные изменения деталей и узлов базового двигателя.

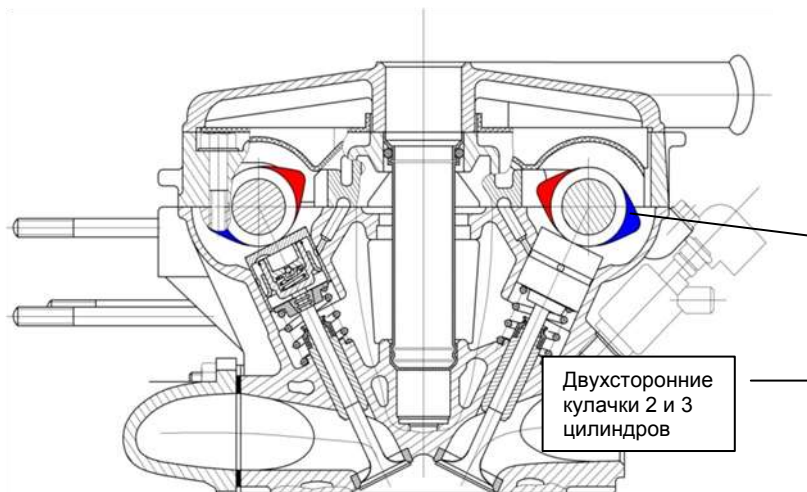


Рис. 3.4. Измененная головка цилиндров двигателя ВАЗ

Два внешних (рабочих) цилиндра четырехцилиндрового двигателя работают по обычному четырехтактному циклу. В двух внут-

ренных (эспандерных) цилиндрах происходит продолженное расширение газов, которое может быть названо пятым тактом. Таким образом, в эспандерных цилиндрах осуществляются только такты расширения и выпуска отработавших газов.

Двигатель имеет два распределительных вала. Оба вала обслуживают как внешние рабочие цилиндры, так и внутренние эспандерные цилиндры, совершая один оборот за два оборота коленчатого вала так, как это происходит в традиционных четырехтактных ДВС. Кулачки, обслуживающие эспандерные цилиндры, имеют двухсторонний профиль (рис. 3.4). Благодаря этому в эспандерных цилиндрах осуществляется двухтактный цикл расширения и выпуска.

Рабочий цикл двигателя состоит из четырех фаз (рис. 3.5).

Фаза А. Поршни в рабочих цилиндрах движутся от ВМТ к НМТ. Поршни в эспандерных цилиндрах движутся от НМТ к ВМТ. В первом рабочем цилиндре осуществляется впуск свежего заряда, а во втором рабочем цилиндре – сгорание (предварительное расширение). В эспандерных цилиндрах осуществляется выпуск газов.

Фаза В. Поршни в рабочих цилиндрах движутся от НМТ к ВМТ. Поршни в эспандерных цилиндрах движутся от ВМТ к НМТ. В первом рабочем цилиндре осуществляется сжатие свежего заряда, а во втором рабочем цилиндре – вытеснение выпускных газов в эспандерные цилиндры. В эспандерных цилиндрах осуществляется процесс продолженного расширения выпускных газов из второго рабочего цилиндра.

Фаза С. Поршни в рабочих цилиндрах движутся от ВМТ к НМТ. Поршни в эспандерных цилиндрах движутся от НМТ к ВМТ. В первом рабочем цилиндре осуществляется сгорание (предварительное расширение), а во втором рабочем цилиндре – впуск свежего заряда. В эспандерных цилиндрах осуществляется выпуск газов.

Фаза *D* аналогична Фазе *B*, в которой первый и второй цилиндры ВД меняются местами.

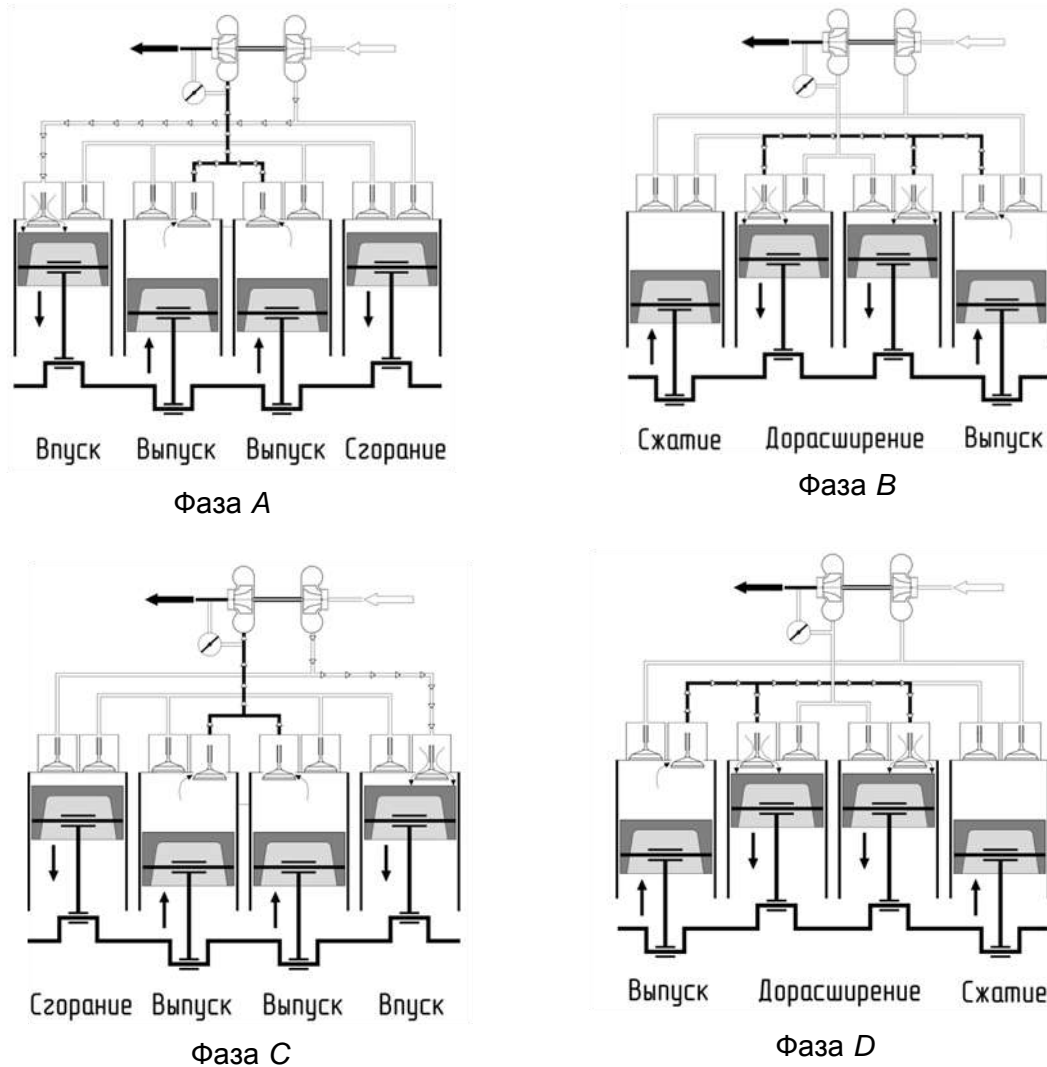


Рис. 3.5. Фазы рабочего цикла

Последовательность тактов рабочего цикла дана в табл. 3.2.

Таким образом, рабочий цикл двигателя с продолженным расширением осуществляется за два оборота коленчатого вала и состоит из двух групп процессов. Первая группа включает процессы впуска и предварительного расширения в первом или втором рабочих цилиндрах и выпуск газов из эспандерных цилиндров. Вторая группа включает процессы сжатия и вытеснения выпускных газов в

первом или втором рабочих цилиндрах и дополнительное расширение выпускных газов в эспандерных цилиндрах.

Таблица 3.2

Последовательность тактов рабочего цикла двигателя
с продолженным расширением

Фаза	Цилиндр			
	1	2	3	4
A	Впуск	Выпуск	Выпуск	Расширение
B	Сжатие	Расширение	Расширение	Вытеснение
C	Расширение	Выпуск	Выпуск	Впуск
D	Вытеснение	Расширение	Расширение	Сжатие

На рисунке 3.6 показаны термодинамические циклы двигателя с продолженным расширением.

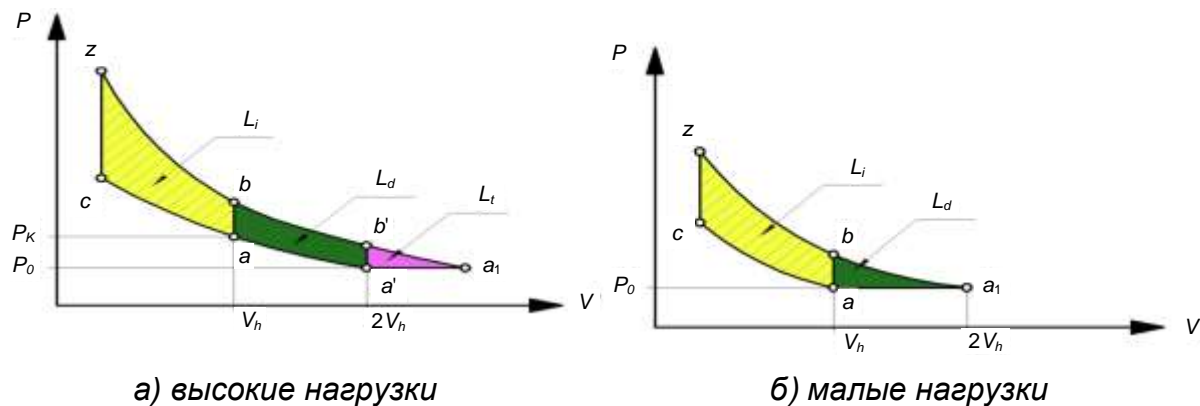


Рис. 3.6. Термодинамические циклы двигателя с продолженным расширением:
 L_i – индикаторная работа двигателя; L_d – работа, произведенная
в эспандерных цилиндрах; L_t – работа, произведенная
в турбине турбокомпрессора

Для оценки влияния на топливную экономичность уменьшения рабочего объема двигателя и продолженного расширения были проведены расчетные исследования его рабочего процесса. Были рассмотрены следующие варианты двигателя:

- стандартный вариант, при котором 4 цилиндра работают без наддува;
- одна пара цилиндров работает с наддувом, а в другой паре цилиндров удаляются клапаны с целью ликвидации насосных потерь;

– двигатель-эспандер (ДЭ), в котором одна пара цилиндров является рабочей, а в другой паре цилиндров – эспандерной осуществляется продолженное расширение.

Во всех вариантах обеспечивается приблизительно одинаковая мощность двигателя. В качестве ограничивающих факторов при форсировании 2 цилиндров с помощью наддува были приняты: отсутствие детонации, максимальное давление сгорания не выше 5,5 МПа и максимальная температура газов на входе в турбину турбокомпрессора 1050°С. Работоспособность двигателя ВАЗ 11194 с таким уровнем параметров была подтверждена в цикле испытаний в ГНЦ «НАМИ» [10]. В двух работающих цилиндрах, использующих наддув, степень сжатия стандартного двигателя 10,8 была уменьшена до 9,0. При этом был сохранен приемлемый уровень нагрузок на детали двигателя [19].

На рисунке 3.7 даны нагрузочные характеристики вариантов двигателя ВАЗ при частоте вращения коленчатого вала $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$.

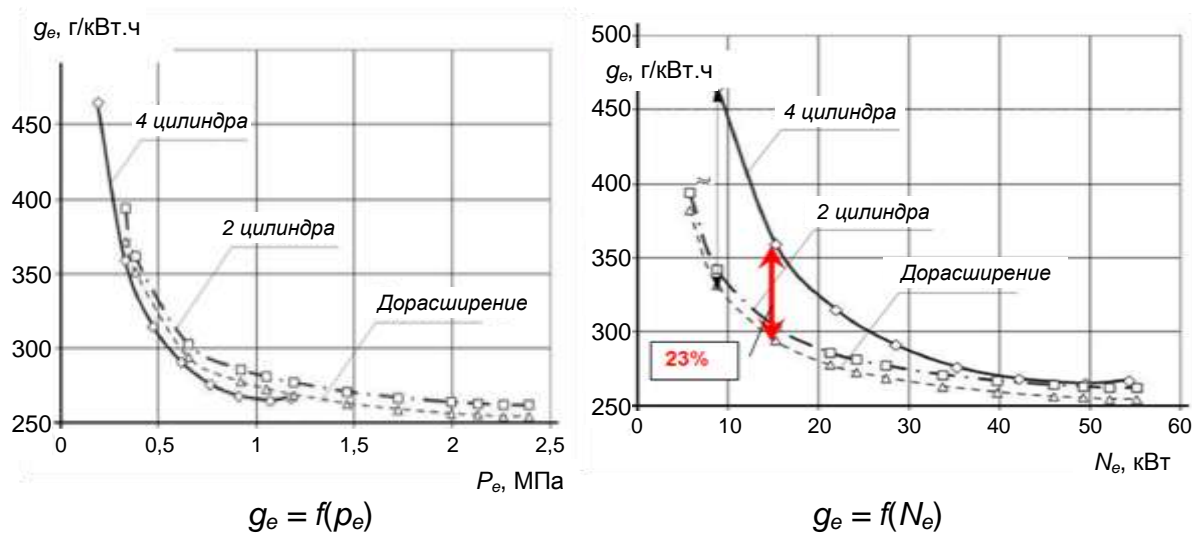


Рис. 3.7. Нагрузочные характеристики двигателя ВАЗ, $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$

Из сравнения вариантов на графике $g_e = f(p_e)$ следует, что при одинаковой величине среднего эффективного давления стандарт-

ный вариант имеет меньший уровень удельного эффективного расхода топлива по сравнению с другими вариантами. Указанное объясняется пониженной степенью сжатия двигателя в вариантах с двумя рабочими цилиндрами, что вызывает уменьшение индикаторного КПД, а также увеличенными механическими потерями за счет двух выключенных цилиндров.

Картина меняется при сравнении вариантов на графике $g_e = f(N_e)$ при одинаковой мощности. Варианты с двумя рабочими цилиндрами по величине удельного эффективного расхода топлива выигрывают у стандартного варианта 4-цилиндрового двигателя без наддува, причем этот выигрыш существенно увеличивается при снижении мощности. На характерном режиме городского движения автомобиля Лада Калина ($N_e = 15 \text{ кВт}$; $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$) вариант ДЭ с продолженным расширением по топливной экономичности более чем на 20% превосходит стандартный вариант двигателя.

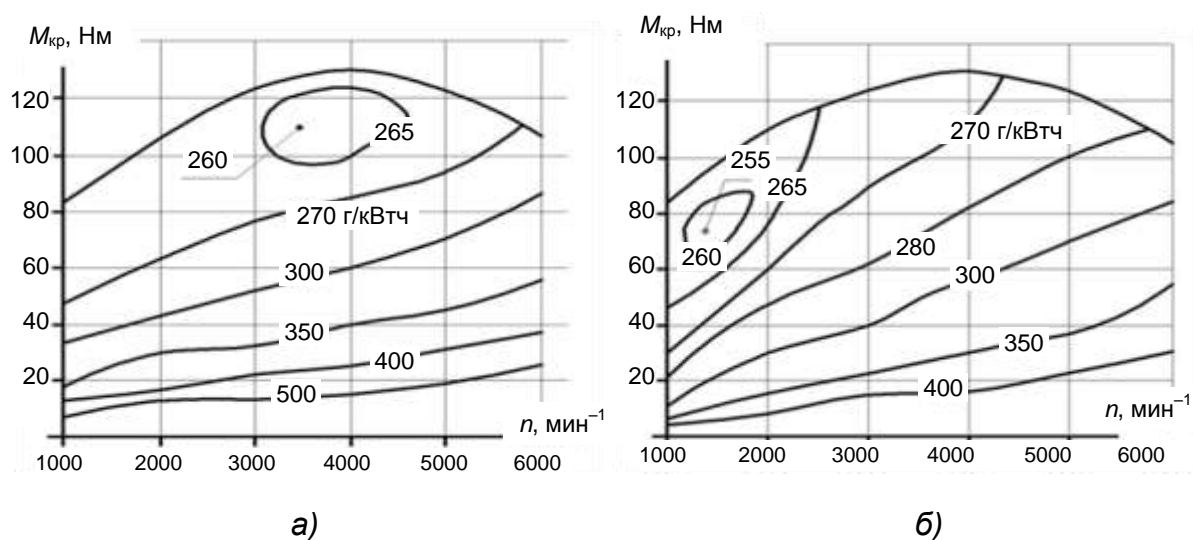


Рис. 3.8. Многопараметровые характеристики двигателя ВАЗ:
а) стандартный вариант; б) двигатель-эспандер

На рисунке 3.8 даны нагрузочные характеристики вариантов двигателя ВАЗ. У варианта ДЭ величина минимального удельного эффективного расхода топлива несколько ниже, по сравнению со

стандартным вариантом. Но существенно более значимым преимуществом варианта ДЭ является смещение зоны малых величин удельного расхода топлива в область низких нагрузок и частот вращения коленчатого вала, что благоприятно сказывается на расходе топлива автомобилем.

Схема воздействия различных факторов на повышение топливной экономичности варианта двигатель-эспандер иллюстрируется рис. 3.9.



Рис. 3.9. Схема повышения топливной экономичности варианта двигатель-эспандер

Форсирование двух рабочих цилиндров с помощью наддува позволяет обеспечить необходимую мощность двигателя на режимах частичных нагрузок при более высоком уровне среднего эффективного давления по сравнению со стандартным вариантом 4-цилиндрового двигателя без наддува. При этом ощутимо увеличивается механический КПД. Необходимость снижения степени сжатия для предотвращения детонации и уменьшения нагрузок на детали двигателя приводит к некоторому снижению индикаторного КПД, которое компенсируется за счет продолженного расширения газов в эспандерных цилиндрах. В итоге обеспечивается выигрыш в эффективном КПД варианта двигатель-эспандер.

Параметры вариантов двигателя ВАЗ 11194 даны в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры вариантов двигателя ВАЗ 11194

Вариант	Стандартный	ДЭ
Количество цилиндров	4	
Число клапанов	16	
Диаметр цилиндра, мм	76,5	
Ход поршня, мм	75,6	
Рабочий объем цилиндров, л	1,39	0,7 (условно)
Степень сжатия	10,8	9,0
Номинальная мощность, кВт, при $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$	65	
Максимальный крутящий момент, Нм, при $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$	130	
g_{emin} по многопараметровой характеристике, г/кВт·ч	260	255 (↓ 2%)
g_e на характерном режиме городского дви- жения автомобиля Лада Калина ($N_e = 15 \text{ кВт}$; $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$), г/кВт·ч	375	290 (↓ 23%)

Дальнейшим развитием двигателей с разделенными тактами могут стать конструкции с различными переключаемыми комбинациями работы, при которых цилиндры попеременно выполняют функции рабочих, эспандерных или компрессорных цилиндров. Это направление подробно описано в разделе 4 настоящего пособия.

Проведенные исследования свидетельствуют о значительных резервах существенного повышения топливной экономичности двигателей ВАЗ, как впрочем, и других 4-цилиндровых двигателей, при разделении тактов цикла и продолженным расширением рабочего тела. Применение в двигателе новой схемы осуществления рабочих процессов не требует значительных изменений конструкции стандартного двигателя. Однако элементы стандартного двигателя должны обеспечивать его работоспособность при современном уровне тепловых и механических нагрузок.

Модификации стандартного двигателя с продолженным расширением могут быть особо востребованы для транспортных средств со специфическими условиями эксплуатации, например для автомобилей, с преобладающей долей городских режимов. Несомненно, что специфические особенности модификации двигатель-эспандер делают ее весьма привлекательной для использования в составе комбинированных энергоустановок.

Шеститактные двигатели

Шеститактным двигателем называют ДВС, у которого к четырем тактам традиционного цикла добавлены два дополнительных такта. Шеститактные двигатели, как правило, являются однообъемными с совершением всех тактов цикла в одном цилиндре. Во время дополнительных тактов к рабочему телу подводится теплота от нагретых поверхностей камеры сгорания, которая утилизируется на такте расширения.

Одним из первых шеститактных двигателей был двигатель Гриффина (S. Griffin), изготовленный в Англии в 1883 г. В этом двигателе после завершения такта выпуска отработавших газов происходил такт впуска воздуха без подачи топлива, а затем осуществлялся такт выпуска воздуха. Дополнительные такты обеспечивали снижение температуры элементов камеры сгорания и улучшение очистки цилиндров от остаточных газов, способствуя повышению наполнения.

Существует значительное количество конструкций шеститактных двигателей. Рассмотрим наиболее характерные из них.

Двигатель Кроуэра

Американским инженером Б. Кроуэром (Bruce Crower) разработана конструкция и изготовлены образцы двигателей, в цилиндры

которых после завершения такта выпуска подается вода под давлением 15 МПа [20]. Отбирая теплоту от нагретых поверхностей камеры сгорания, вода испаряется. При ходе поршня от ВМТ к НМТ водяной пар, расширяясь, совершает полезную работу (пятый такт – паровой рабочий ход). При ходе поршня от НМТ к ВМТ (шестой такт) осуществляется выпуск отработавшего пара. Отработавший пар поступает в конденсатор, где охлаждается и снова превращается в воду. Последовательность тактов двигателя Кроуэра показана на рис. 3.10. Строго говоря, цикл двигателя Кроуэра состоит из четырехтактного и двухтактного циклов (4+2).

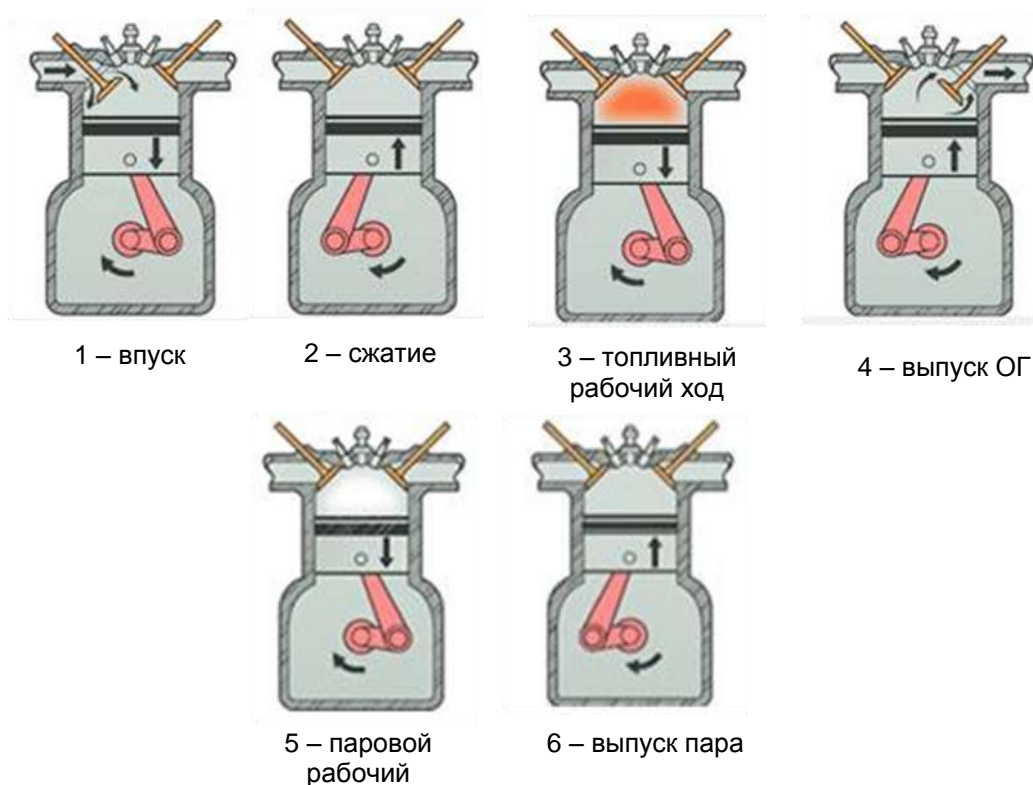


Рис. 3.10. Последовательность тактов двигателя Кроуэра

Цикл двигателя Кроуэра отличается от традиционного цикла Отто не только количеством тактов, но и отношением количества рабочих тактов к их общему числу. Так, у цикла Отто это отношение составляет 1:4, а у цикла Кроуэра – 1:3.

Достоинствами двигателя Кроуэра являются высокая топливная экономичность за счет утилизации теплоты от стенок камеры сгорания и возможность уменьшить габариты элементов системы охлаждения, или вообще от нее отказаться. Кроме того, внутреннее охлаждение позволяет существенно повысить степень сжатия двигателя с искровым зажиганием, что также положительно скажется на топливной экономичности.

Среди недостатков двигателя Кроуэра следует отметить необходимость установки на автомобиле дополнительного оборудования для хранения и конденсации воды. Серьезной проблемой является необходимость предотвращения замерзания воды в зимних условиях эксплуатации. Для изготовления клапанов, поршня и гильзы цилиндра, скорее всего, потребуются специальные нержавеющие материалы.

Технология подачи воды широко применялась во время Второй мировой войны в авиационных двигателях американских и немецких самолетов для их форсирования. Системой впрыска воды оснащались авиамоторы DaimlerBenz серии 605 и BMW 801D для Messerschmitt Bf 109, Junkers Ju86 213 A1 для FockeWulf 190D, Pratt&Whitney J57 для американского B-29 Stratofortress и многие другие. Вода добавлялась в уже готовую смесь, охлаждая ее, и попадала вместе с ней в камеру сгорания. От контакта с раскаленной поверхностью поршня и стенок цилиндра вода мгновенно превращалась в пар, который расширяясь увеличивал мощность двигателя. Предварительное охлаждение топливовоздушной смеси позволяло увеличить ее объем на впрыске и повышало эффективность сгорания топлива. Впоследствии воду заменили специальной смесью, состоящей из равных частей воды и метанола, тем самым увеличив мощность двигателей на 25–30%.

Двигатель Баюласа

Двигатель Баюласа разработан в компании Bajulaz S. A. (Швейцария). Схема двигателя представлена на рис. 3.11 [21, 22].

В двигателе Баюласа реализован рабочий процесс с воспламенением от сжатия. В головке цилиндра размещены камера сгорания 6 и камера нагрева 7, а также четыре клапана, два из которых управляют процессами впуска и выпуска, а два других расположены в каналах, соединяющих цилиндр (надпоршневое пространство) с камерами сгорания и нагрева.

В двигателе Баюласа реализован рабочий процесс с воспламенением от сжатия. В головке цилиндра размещены камера сгорания 6 и камера нагрева 7, а также четыре клапана, два из которых управляют процессами впуска и выпуска, а два других расположены в каналах, соединяющих цилиндр (надпоршневое пространство) с камерами сгорания и нагрева.

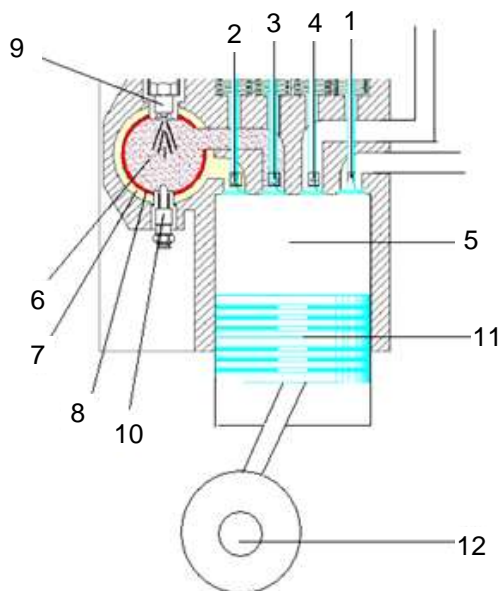


Рис. 3.11. Схема двигателя Баюласа:

1 – впускной клапан; 2 – клапан камеры нагрева; 3 – клапан камеры сгорания; 4 – выпускной клапан; 5 – цилиндр; 6 – камера сгорания; 7 – камера нагрева; 8 – стенка камеры сгорания; 9 – форсунка; 10 – свеча накаливания; 11 – поршень; 12 – коленчатый вал

Последовательность тактов в двигателе Баюласа дана на рис. 3.12.

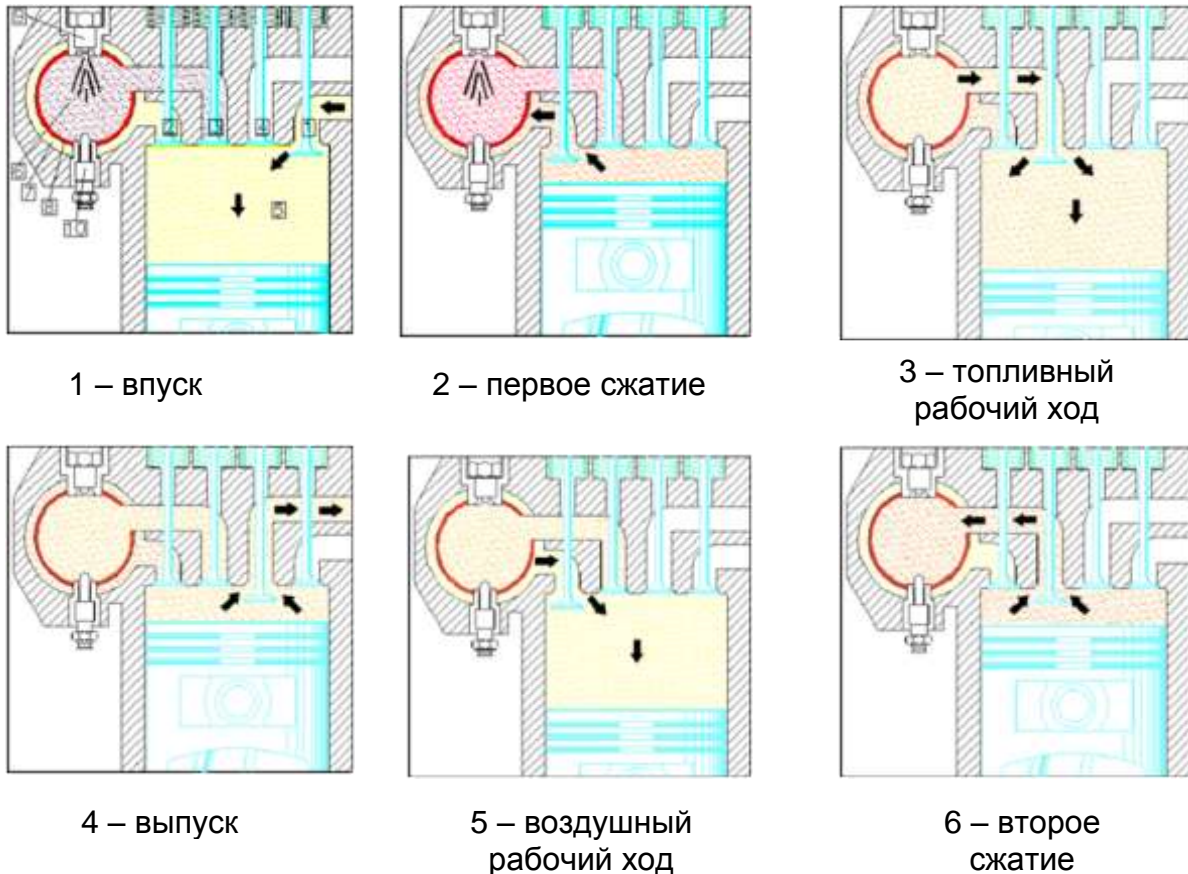


Рис. 3.12. Последовательность тактов в двигателе Баюласа

1 – впуск. На такте впуска открыт только впускной клапан, и воздух поступает в цилиндр.

2 – первое сжатие. Во время такта сжатия воздух поступает в камеру нагрева, где нагревается как в процессе сжатия, так и получая тепло от стенки камеры сгорания. В конце такта сжатия осуществляется подача топлива в камеру сгорания, в которой находится воздух, сжатый в предшествующем рабочем цикле.

3 – топливный рабочий ход. Во время топливного рабочего хода при открытом клапане камеры сгорания газы из последней перетекают в цилиндр, в котором расширяются.

4 – выпуск. Отработавшие газы при открытом выпускном клапане удаляются из цилиндра. В связи с тем, что часть теплоты газов передана воздуху в камере нагрева, тепловые потери с отработавшими газами меньше, чем в традиционных четырехтактных двигателях.

5 – воздушный рабочий ход. Нагретый сжатый воздух из камеры нагрева поступает в цилиндр, расширяясь в котором совершает полезную работу.

6 – второе сжатие. Расширившийся воздух снова сжимается, поступая в камеру сгорания для последующего использования в топливном рабочем ходе.

Утилизация теплоты отработавших газов способствует повышению топливной экономичности двигателя Баюласа. Однако, он также имеет недостатки, присущие дизелям с разделенными камерами сгорания, такие как потери теплоты из-за увеличенных поверхностей камеры сгорания и невысокие пусковые качества. Кроме того, наличие дополнительных камер и клапанов с индивидуальными законами управления значительно усложняет конструкцию головки цилиндров двигателя.

Двигатель *Revelation Power*

В канадской компании *Revelation Power Technology* разработана конструкция и изготовлены образцы восьмитактного двигателя, в двухцилиндровом модуле которого поршень второго (правого) цилиндра движется с запаздыванием на 90° относительно поршня первого (левого) цилиндра (см. рис. 3.13) [23]. Первый цилиндр оснащен впускным клапаном для подачи топливно-воздушной смеси и перепускным клапаном, соединяющим первый и второй цилиндры. Второй цилиндр имеет впускной клапан для подачи воздуха и выпу-

ской клапан, для удаления отработавших газов. Рабочий цикл двигателя осуществляется за два оборота коленчатого вала.

Последовательность тактов рабочего цикла двигателя *Revelation Power* показана на рис. 3.13.

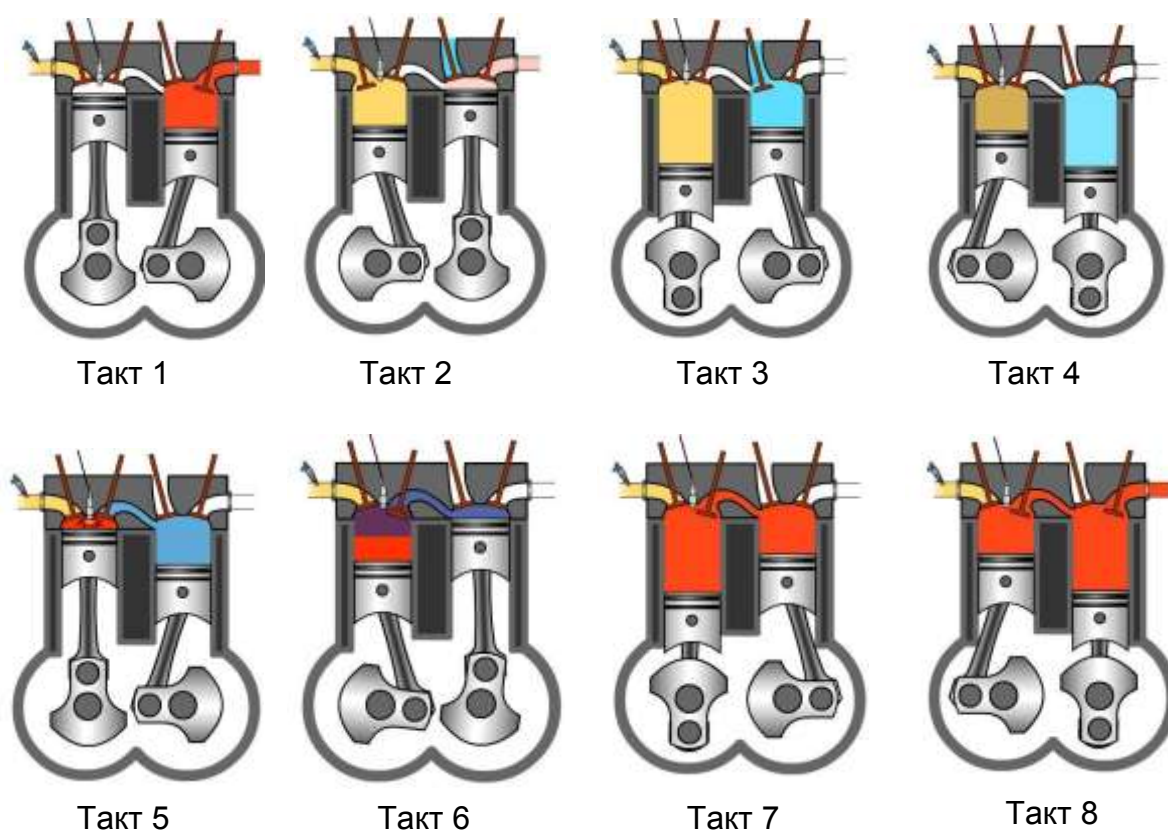


Рис. 3.13. Последовательность тактов рабочего цикла двигателя *Revelation Power*

Такт 1. Поршень первого цилиндра движется вниз, а поршень второго цилиндра – вверх. В первом цилиндре происходит наполнение топливно-воздушной смесью, а во втором цилиндре – выпуск отработавших газов. По завершении такта 1 поршень второго цилиндра достигает ВМТ и второй выпускной клапан закрывается.

Такт 2. В первом цилиндре продолжается наполнение, которое завершается при достижении поршня НМТ. Во второй цилиндр начинает поступать воздух, забирая теплоту от стенок цилиндра.

Такт 3. В первом цилиндре завершается наполнение и начинается сжатие топливно-воздушной смеси. Второй цилиндр продолжает наполняться воздухом.

Такт 4. В первом цилиндре завершается сжатие топливно-воздушной смеси. Во втором цилиндре завершается его наполнение воздухом.

Такт 5. В первом цилиндре при нахождении поршня в области ВМТ происходит воспламенение топливно-воздушной смеси от свечи зажигания. Во втором цилиндре начинается сжатие воздуха.

Такт 6. В первом цилиндре происходит расширение газов, а во втором цилиндре завершается сжатие воздуха.

Такт 7. Первый и второй цилиндры сообщаются друг с другом при открытом перепускном клапане, и происходит совместное расширение рабочего тела в двух цилиндрах. Воздух из второго цилиндра разбавляет газы в первом цилиндре.

Такт 8. Отработавшие газы удаляются из первого и второго цилиндров.

Двигатели с добавленными тактами имеют потенциал существенного улучшения топливной экономичности, как за счет продолженного расширения рабочего тела, так и утилизации теплоты, отведенной от нагретых поверхностей камеры сгорания. Однако, увеличение тактности сопряжено с появлением определенных проблем, которые необходимо решать, или, по крайней мере, учитывать.

Добавление дополнительных тактов при прочих равных условиях неизбежно приводит к снижению литровой мощности двигателя. Указанное обстоятельство может быть частично компенсировано за счет наддува. Дополнительные такты требуют внесения изменений в систему газообмена, усложняющих конструкцию двигателя. Использо-

зование в двигателе нетрадиционных компонентов рабочего тела, таких как вода, требует изменения номенклатуры материалов и, возможно, конструкции деталей, ограничивающих камеру сгорания.

Поэтому, для принятия решений о создании двигателей с дополнительными тактами необходим взвешенный анализ улучшения топливной экономичности, с одной стороны, и возможными издержками, связанными с усложнением конструкции, сопровождающими это улучшение. В любом случае, плата за снижение расхода топлива и улучшение экологических показателей двигателя, обеспечивающая экономическую целесообразность его производства, не должна быть чрезмерно высокой.

4. ДВИГАТЕЛИ С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОМБИНАЦИЕЙ ТАКТОВ

Различным режимам и условиям работы двигателя в большей или меньшей степени соответствуют различные рабочие циклы. Например, в отличие от четырехтактного цикла, осуществляемого за два оборота коленчатого вала, двухтактный цикл совершается за один оборот коленчатого вала. Поэтому рабочий объем двухтактного двигателя будет значительно меньше рабочего объема четырехтактного двигателя такой же мощности.

Перевод двигателя на режимах больших нагрузок с четырехтактного на двухтактный цикл позволил бы обеспечить необходимые тягово-скоростные свойства автомобиля двигателю с уменьшенным рабочим объемом и снизить при этом расход топлива. Повышение топливной экономичности происходит за счет роста механического КПД в первую очередь из-за увеличения среднего эффективного давления, а также снижения потерь трения при уменьшении количества ходов поршня в рабочем цикле.

В британской инжиниринговой компании *Ricardo* разработан двигатель 2/4 SIGHT, способный плавно переходить из четырехтактного режима работы в двухтактный [24]. В двигателе используется система электрогидравлического привода клапанов *Denso* и двухступенчатая система наддува (газотурбинный и механический). На малых и средних нагрузках в двигателе реализуется четырехтактный цикл, и только на режиме высоких нагрузок двигатель переводится на работу по двухтактному циклу (рис. 4.1). Причем переход происходит плавно и может производиться как на установившихся, так и в переходных режимах.

Принцип 2/4 SIGHT реализован в серийном двигателе с рабочим объемом 2 л, предназначенным для замены стандартного дви-

гателя той же мощности с рабочим объемом 3,5 л. Моделирование работы двигателя в составе автомобиля при движении по новому европейскому циклу NEDC (New European Drive Cycle) показало возможность снижения расхода топлива на 27%.

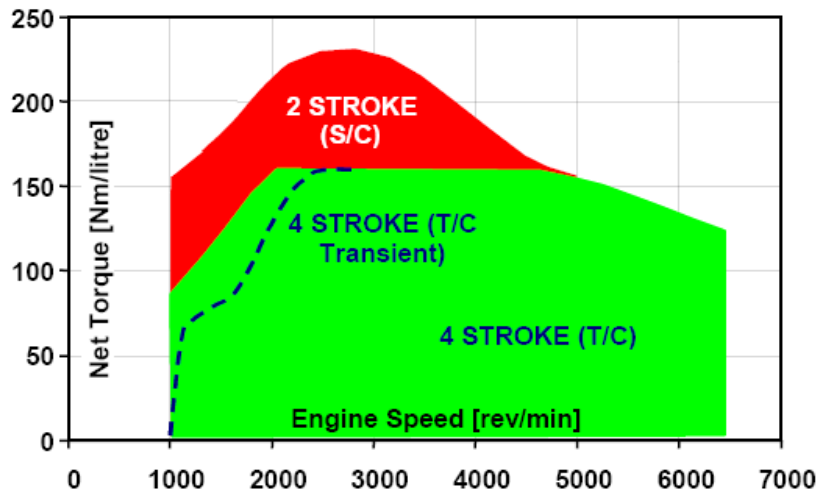


Рис. 4.1. Зоны режимов работы двигателя Ricardo 2/4 SIGHT

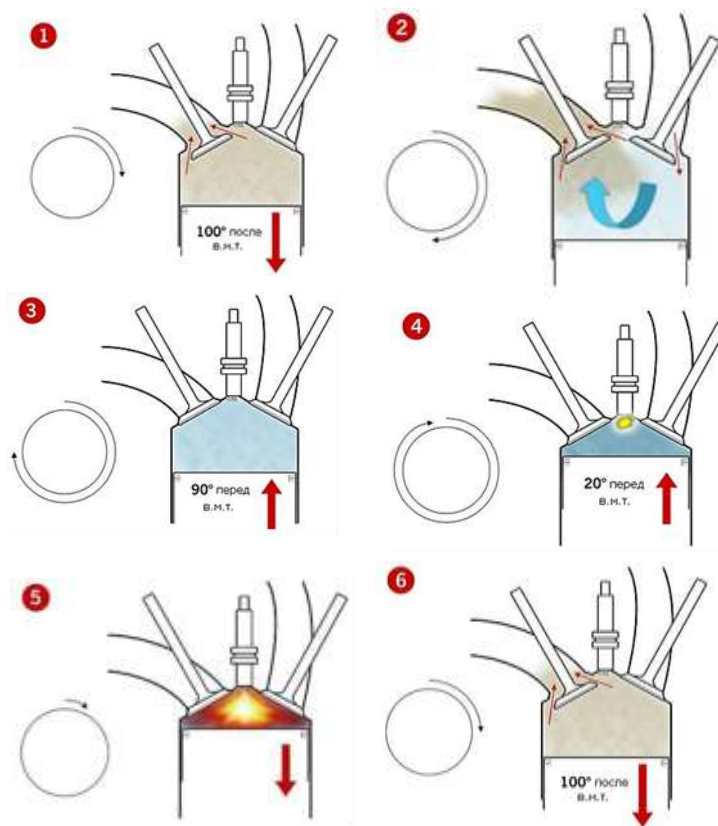


Рис. 4.2. Последовательность осуществления двухтактного цикла

Четырехтактный цикл в двигателе организован достаточно традиционно для бензиновых двигателей с внутренним смесеобразованием. Последовательность осуществления двухтактного цикла показана на рис. 4.2. Через 100° поворота коленчатого вала после ВМТ открывается выпускной клапан и начинается выпуск, сопровождающийся движением поршня к НМТ. Ближе к НМТ открывается впускной клапан и начинается продувка цилиндра воздухом с избыточным давлением, создаваемым нагнетателем. Примерно через 60° после НМТ выпускной и впускной клапаны закрываются и начинается процесс сжатия. В ходе процесса сжатия в цилиндр подается топливо и ближе к ВМТ осуществляется зажигание. Процесс сгорания и расширения занимает 100° ПКВ и завершается при открытии выпускного клапана.

Переход от четырехтактного к двухтактному циклу требует значительного изменения фаз газораспределения. В первую очередь необходимо увеличить в два раза частоту открытия и закрытия клапанов, а также иметь возможность управлять моментами их открытия и закрытия. Для решения этих задач фирма *Ricardo* использует электрогидравлический привод клапанов (рис. 4.3).

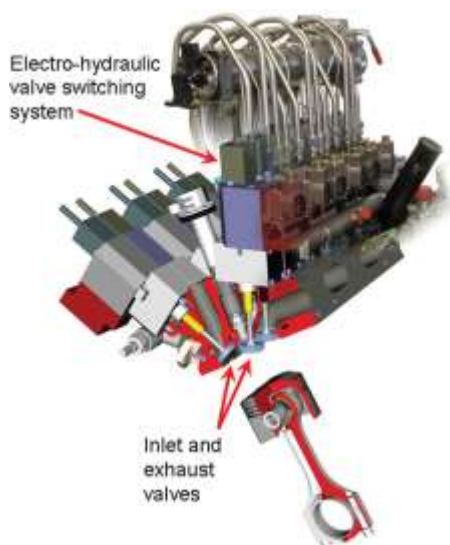
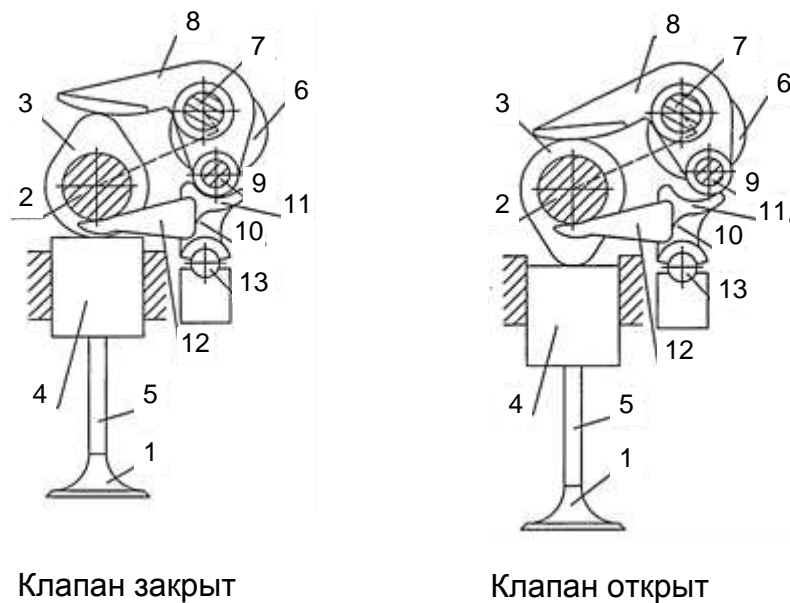


Рис. 4.3. Электрогидравлический привод клапанов

Системы газораспределения с электрогидравлическим приводом клапанов, имеющие большие возможности гибкого изменения параметров, пока не вышли на уровень промышленного производства. В этой связи интерес представляют системы газораспределения, позволяющие также изменять частоту открытия и закрытия клапанов, но базирующиеся на традиционных технических решениях с кулачковым приводом клапанов.

Одно из таких устройств, разработанное в НАМИ, показано на рис. 4.4 и 4.5 [25].



*Рис. 4.4. Привод клапана НАМИ. Работа по четырехтактному циклу:
 1 – тарелка клапана; 2 – кулачковый вал; 3 – кулачек; 4 – толкатель;
 5 – шток клапана; 6 – эксцентриковый вал; 7 – эксцентрик; 8 – коромысло;
 9 – ролик; 10 – двуплечий рычаг; 11 – гребень; 12 – лапки;
 13 – цилиндрическая опора*

Устройство привода клапана НАМИ содержит кулачковый вал 2 с кулачком 3, имеющий постоянный привод от вала двигателя через понижающую зубчатую передачу, обеспечивающую вращение кулачкового вала в два раза медленнее вала двигателя. Помимо непосредственного привода от кулачка 3 клапан имеет дополни-

тельный привод, содержащий поворотный вал 6 с эксцентриком 7, на котором установлено коромысло 8.

Одно из плеч коромысла 8 расположено напротив кулачка 3 вала 2. Другое плечо коромысла 8, на котором установлен ролик 9, расположено у плеча фигурного двуплечего рычага 10 напротив выполненного на конце рычага гребня 11 с профилированной поверхностью. Рычаг 10 выполнен с лапками 12, образующими другое его плечо. Лапки 12 рычага 10 расположены напротив толкателя 4 клапана по разные стороны кулачка 3. Рычаг 10 установлен на цилиндрической опоре 13, образуя с ней шарнирную связь.

При работе двигателя по четырехтактному циклу клапан имеет привод только непосредственно от кулачка 3 (рис. 4.4). Во время вращения кулачкового вала 2 кулачок 3 периодически нажимает на толкатель 4 клапана, открывая клапан для впуска в цилиндр двигателя воздуха при использовании этого клапана в качестве впускного клапана либо для выпуска из цилиндра горячего газа при использовании этого клапана в качестве выпускного клапана.

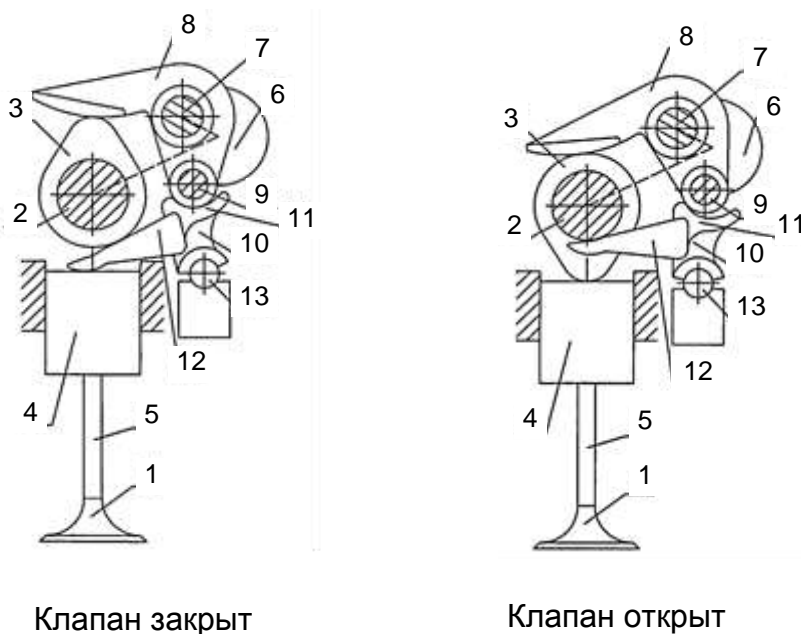


Рис. 4.5. Привод клапана НАМИ. Работа по двухтактному циклу

Для работы двигателя по двухтактному циклу вал 6 с эксцентриком 7 поворачивают, перемещая ось коромысла 8 в сторону кулачка 3. При этом ролик 9 вступает в контакт с гребнем 11 (рис. 4.5). Другое плечо коромысла, нажимая роликом 9 на гребень 11 рычага 10, поворачивает этот рычаг, который своими лапками 12 действует на толкатель, открывая этот клапан. При отходе выступа кулачка от плеча коромысла 8 рычаг 10 возвращается в исходное положение, и клапан закрывается. Следующее открытие клапана происходит при повороте кулачкового вала на 180° , когда кулачок нажимает на толкатель клапана. Таким образом, при положении коромысла 8, при котором происходит взаимодействие его ролика 9 с гребнем 11 на рычаге 10, клапан открывается дважды за один оборот кулачкового вала, то есть в два раза чаще, чем при его приводе непосредственно от кулачка.

Описанная выше конструкция привода клапана позволяет переводить все цилиндры двигателя с четырехтактного на двухтактный режим работы. Но это же техническое решение может быть использовано для переключения комбинаций тактов в отдельных группах цилиндров.

Хорошо известен и находит применение способ повышения механического КПД двигателя при работе на режимах малых нагрузок за счет отключения отдельных цилиндров прекращением подачи в них топлива. Дополнительный положительный эффект может быть получен при продолженном расширении газов в отключенных цилиндрах, которые из рабочих превращаются в эспандерные цилиндры.

Рассмотрим возможность реализации такой схемы изменения комбинации тактов на примере четырехцилиндрового двигателя с традиционным порядком работы цилиндров 1-3-4-2.

Двигатель или двигатель-эспандер (Д или ДЭ)

На рисунке 4.6 дана схема реализации переключаемой комбинации тактов Д или ДЭ, запатентованная НАМИ [26, 27].

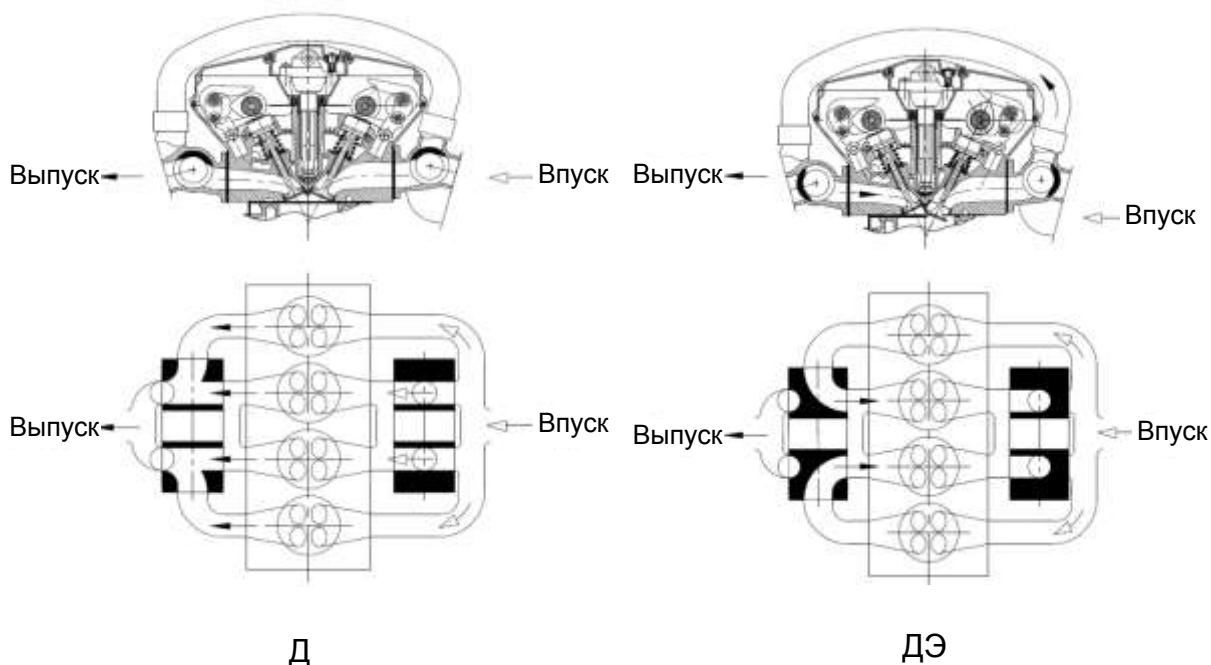


Рис. 4.6. Схема смены комбинаций Д или ДЭ

В двигателе осуществляются два режима работы – две комбинации тактов рабочего цикла: на первом режиме происходит работа всех четырех цилиндров по четырехтактному циклу (как в обычном двигателе), а на втором режиме два внешних цилиндра так же работают по четырехтактному циклу, а два внутренних цилиндра работают по двухтактному циклу как расширительная машина (эспандер) с утилизацией энергии выхлопных газов, поступающих поочередно из внешних рабочих цилиндров.

Поршни в каждой паре цилиндров (внешние и внутренние) движутся синфазно. Фазовый сдвиг в движении внешних поршней по отношению к внутренним поршням составляет 180° . Во впускном и выпускном коллекторах двигателя размещены управляющие золотники, которые могут занимать два положения.

В первом положении золотников впускные каналы внутренних цилиндров соединяются с впускным коллектором, а выпускные каналы соединяются с выпускным коллектором. Все цилиндры и внешние, и внутренние работают по традиционному четырехтактному циклу (режим Д). Этот режим применяется на высоких нагрузках.

Во втором положении золотников впуск во внутренние цилиндры соединяется с выпуском из внешних цилиндров (режим ДЭ). При этом внутренние цилиндры переводятся на работу по двухтактному циклу с помощью устройства привода клапанов, описанного выше.

Режим соответствует малым и средним нагрузкам. Два внешних цилиндра (1-й и 4-й) работают по обычному четырехтактному циклу. В двух внутренних цилиндрах (2-м и 3-м) происходит продолженное расширение газов.

Рабочий цикл двигателя осуществляется за два оборота коленчатого вала и состоит из двух групп процессов. Первая группа включает процессы впуска и сгорания в 1-м или 4-м (внешних) цилиндрах при движении поршней от ВМТ к НМТ и выпуск газов из внутренних цилиндров 2-го и 3-го при движении поршней от НМТ к ВМТ. Вторая группа включает процессы сжатия и вытеснения в 1-м или 4-м цилиндрах при движении поршней от НМТ к ВМТ и расширение выпускных газов в цилиндрах 2-м и 3-м при движении поршней от ВМТ к НМТ.

На малых и средних нагрузках в двух внутренних цилиндрах осуществляется продолженное расширение выпускных газов из внешних цилиндров с последующим выпуском в атмосферу или турбину турбокомпрессора.

Последовательность процессов в цилиндрах двигателя при комбинации тактов ДЭ дана в табл. 4.1.

Последовательность процессов в цилиндрах двигателя
при комбинации тактов ДЭ

Номер цилиндра			
1	2	3	4
Впуск	Выпуск		Сгорание
Сжатие	Расширение		Вытеснение
Сгорание	Выпуск		Впуск
Вытеснение	Расширение		Сжатие

Внутренние цилиндры 2-й и 3-й фактически функционируют как единый цилиндр с удвоенным рабочим объемом. В режиме ДЭ двигатель работает по пятитактному циклу, в котором реализуются следующие такты:

Такты: 1 Впуск; 2 Сжатие; 3 Сгорание – поочередно осуществляются в одном из внешних цилиндров;

Такт 4 Расширение – вытеснение выпускных газов из одного из внешних цилиндров с одновременным их продолженным расширением в объединенных внутренних цилиндрах;

Такт 5 Выпуск – одновременное удаление выпускных газов из объединенных внутренних цилиндров.

Для реализации переключаемой комбинации Д или ДЭ кроме размещения управляющих золотников во впускном и выпускном коллекторах, дополнительно необходим механизм привода клапанов, позволяющий изменять частоту их открытия и закрытия.

Существуют более простые конструкции двигателей с изменяемыми комбинациями работы цилиндров, в которых можно использовать традиционные механизмы привода клапанов.

Двигатель-компрессор или двигатель-эспандер (ДК или ДЭ)

На рисунке 4.7 дана схема реализации переключаемой комбинации тактов ДК или ДЭ, запатентованная НАМИ [28]. Внешние ра-

бочие цилиндры двигателя работают по традиционному четырехтактному циклу, а внутренние цилиндры работают по двухтактному циклу, либо в режиме расширительной машины (эспандера), либо нагнетателя (компрессора). В последнем варианте в компрессорных цилиндрах осуществляется сжатие воздуха, который затем используется в рабочих цилиндрах для наддува.

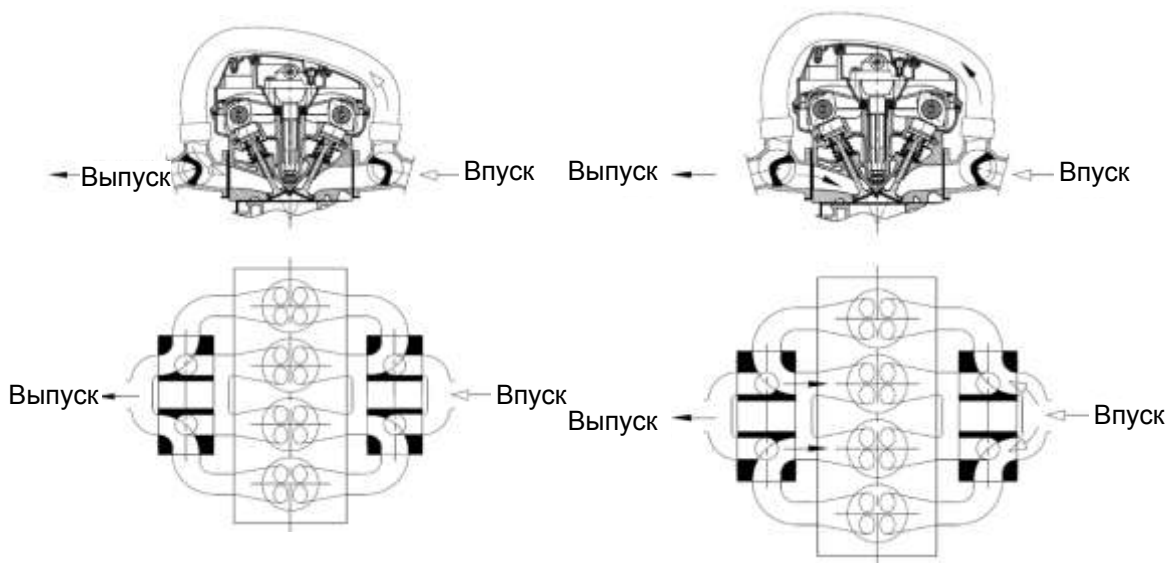


Рис. 4.7. Схема смены комбинаций ДК или ДЭ

Поршни в каждой паре цилиндров (внешние и внутренние) движутся синфазно. Фазовый сдвиг в движении внешних поршней по отношению к внутренним поршням составляет 180° . Во впускном и выпускном коллекторах двигателя размещены управляющие золотники, которые могут занимать два положения.

В первом положении золотников впускные каналы внутренних цилиндров соединяются с впускным коллектором, а выпускные каналы соединяются с впускными каналами внешних цилиндров. Внешние цилиндры работают в режиме двигателя (Д), а внутренние цилиндры в режиме компрессора (К). Эта комбинация режимов используется на высоких нагрузках.

Последовательность процессов в цилиндрах двигателя при комбинации тактов ДК дана в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Последовательность процессов в цилиндрах двигателя
при комбинации тактов ДК

Номер цилиндра			
1	2	3	4
Впуск	Нагнетание		Сгорание
Сжатие	Впуск		Выпуск
Сгорание	Нагнетание		Впуск
Выпуск	Впуск		Сжатие

В режиме ДК двигатель работает по пятитактному циклу, в котором реализуются следующие такты:

Такт 1 Впуск – одновременно осуществляется в два внутренних цилиндра;

Такт 2 Нагнетание – одновременное сжатие воздуха в двух внутренних цилиндрах, совмещенное с его впуском в один из внешних цилиндров;

Такты: 3 Сжатие; 4 Сгорание – поочередно осуществляются в одном из внешних цилиндров.

Такт 5 Выпуск – поочередное удаление выпускных газов из одного из внешних цилиндров.

Режим ДК целесообразно использовать при высоких нагрузках.

5. ДВИГАТЕЛИ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ И РАБОЧИМ ОБЪЕМОМ

Реализуемые в современных двигателях новшества относятся к совершенствованию его систем и агрегатов, в первую очередь элементов топливной аппаратуры, с целью улучшения протекания рабочих процессов. При этом законы движения поршней остаются жестко заданными и зависящими только от неизменных параметров кривошипно-шатунного механизма. Указанное обстоятельство не позволяет использовать такие мощные резервы оптимизации показателей рабочих процессов двигателя во всем диапазоне режимов его работы, как регулирование степени сжатия и рабочего объема.

До последнего времени считалось аксиомой, что степень сжатия является неизменным конструктивным параметром двигателя, таким как, например, диаметр цилиндра. Действительно, в традиционных двигателях величина степени сжатия однозначно определяется размерами кривошипно-шатунного механизма, высотой поршня, а также расположением головки цилиндра относительно оси коленчатого вала.

Как известно, мощность и топливная экономичность двигателя возрастают при увеличении степени сжатия вследствие повышения индикаторного КПД. При достижении величин степени сжатия 13–14 улучшение показателей двигателя прекращается из-за неизбежного роста механических потерь. Поэтому указанные величины степени сжатия являются оптимальными.

В то же время заложенная в конструкцию двигателей величина степени сжатия отличается от оптимальной. В бензиновых двигателях степень сжатия меньше оптимальной и ограничивается детонацией. В дизелях степень сжатия больше оптимальной и выбирается

с учетом обеспечения надежного самовоспламенения топлива при пуске холодного двигателя.

Многочисленные расчеты и экспериментальные исследования показали, что и для бензинового двигателя, и для дизеля регулирование степени сжатия способно обеспечить приблизительно одинаковое улучшение топливной экономичности на 20%, хотя причины этого и алгоритм регулирования степени сжатия для бензинового двигателя и для дизеля различны. В дизеле с регулированием степени сжатия можно значительно увеличить давление наддува, повысив за счет этого мощность. А можно, сохранив прежний уровень мощности, снизить рабочий объем (количество цилиндров), улучшив при этом топливную экономичность, уменьшив массу и стоимость двигателя. В бензиновом двигателе при снижении степени сжатия можно увеличить давление наддува без детонации, повысив при этом литровую мощность со всеми сопутствующими положительными эффектами, в том числе улучшением топливной экономичности на режимах больших нагрузок. При повышении степени сжатия топливная экономичность будет улучшаться на режимах малых нагрузок.

Возможность регулирования рабочего объема еще более ценна для показателей двигателя, чем регулирование степени сжатия. Большой рабочий объем существующих двигателей нужен только для движения автомобиля со скоростями, близкими к максимальной скорости. Эти режимы не превышают 10% общего времени движения автомобиля. Наибольшую часть времени, например, при движении в городе – требуется экономичный двигатель с малым рабочим объемом. Совместное регулирование степени сжатия и рабочего объема открывает широкие перспективы создания двигателя нового типа с управляемым движением поршней. Это – «эластичный» двигатель, гибко приспособляющийся свои объем и степень сжатия к

условиям движения автомобиля. Например, когда нужна большая мощность, этот двигатель эквивалентен 6-цилиндровому двигателю. Если большая мощность не требуется (городской режим движения), он будет соответствовать 4-цилиндровому и даже 3-цилиндровому двигателю обычного типа. При этом может быть обеспечено значительное снижение расхода топлива.

К настоящему времени известно достаточно большое количество способов регулирования степени сжатия ε и рабочего объема, классификация которых дана на рис. 5.1.

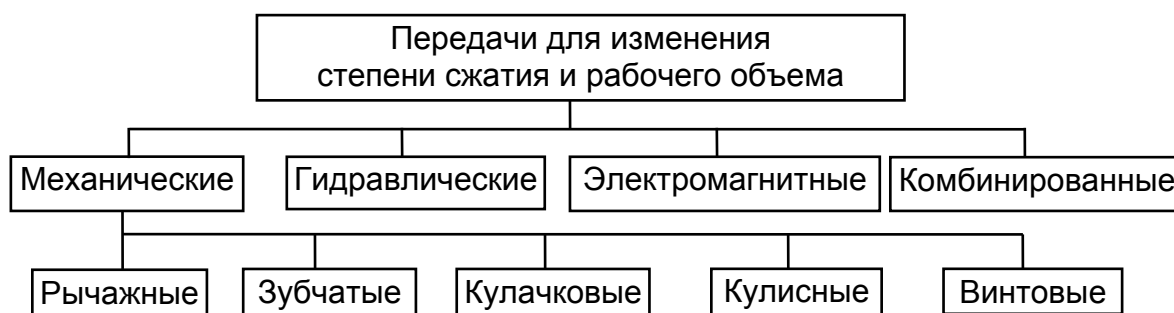


Рис. 5.1. Классификация передач и механизмов для регулирования степени сжатия и рабочего объема

Количество предложенных конструкций, позволяющих регулировать степень сжатия и рабочий объем двигателя очень велико. Однако, подавляющее большинство из них, позволяя решать поставленные задачи по управлению ε и V_h , оказались не пригодными для практической реализации из-за невозможности обеспечить приемлемую работоспособность двигателя, или по технологическим причинам. Поэтому только ограниченное число двигателей было реализовано в металле и лишь единичные конструкции производились серийно.

В начале 90-х годов XX в. в ГНЦ ФГУП «НАМИ» был предложен преобразующий механизм, названный траверсным, позволяющий управлять движением поршней, изменяя степень сжатия и ра-

бочий объем двигателя [10, 29, 30]. Технические решения по траверсному механизму НАМИ защищены патентами разных стран [31–39]. С начала XXI в. работы по двигателям с траверсными преобразующими механизмами активно проводят фирмы *Peugeot*, *Nissan* и *HONDA*. В ГНЦ «НАМИ» было изготовлено более десятка образцов траверсных двигателей с управляемым движением поршней на базе серийных моторов ВАЗ, ЯМЗ и *DaimlerChrysler* [10, 19, 40–44]. Некоторые из них показаны на рис. 5.2, 5.3, 5.4. Траверсные двигатели Т-01 и VE111 прошли испытания на безотказность в объеме 1500 часов.

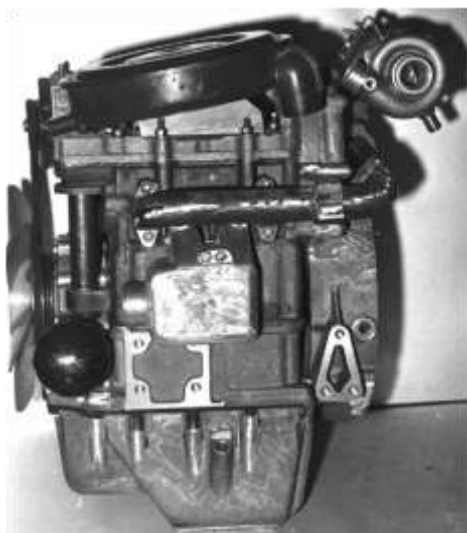
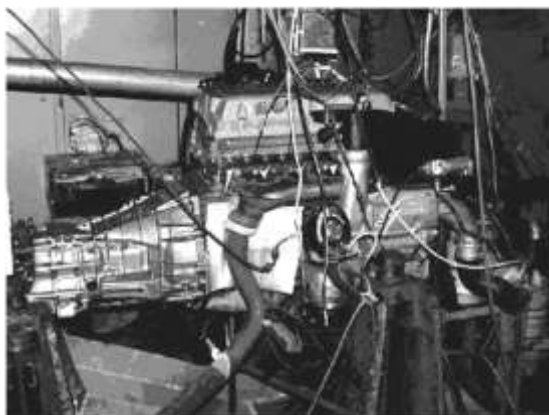


Рис. 5.2. Траверсный дизель ТБ-48 ($iV_h = 1,9$ л)
на базе двигателя Elko 3.82.92Т фирмы Elsbett-Konstruktion (Австрия)



Рис. 5.3. Траверсный дизель Т-01 ($iV_h = 9,1$ л)
и его детали движения на базе двигателя ЯМЗ-8424



а)



б)

*Рис. 5.4. Траверсные двигатели с искровым зажиганием
 а) – VE111 ($iV_h = 2$ л) на базе двигателя M111 DaimlerChrysler;
 б) – ВАЗ 11194VE ($iV_h = 1,4$ л) на базе двигателя ВАЗ 11194*

Траверсный механизм НАМИ работает следующим образом (рис. 5.5). Ось коленчатого вала 1 смещена относительно оси цилиндров. Шатунная шейка 2 коленчатого вала связана с траверсой 3, имеющей еще два цилиндрических шарнира: один соединен с шатуном 4, а второй – с коромыслом 5. Верхний конец коромысла соединен с размещенным в корпусе дизеля эксцентриковым валом 6, а верхний конец шатуна 4 – с поршнем 7. При вращении коленчатого вала поршень совершает возвратно-поступательное движение. Расстояние от плоскости головки цилиндра до днища поршня, при нахождении последнего в ВМТ, определяющее степень сжатия, зависит от координаты оси качания коромысла. Эта координата и, следовательно, степень сжатия двигателя регулируются посредством поворота эксцентрикового вала.

При пуске и работе на режимах холостого хода и малых нагрузок степень сжатия в двигателе максимальная. По мере роста нагрузки и, следовательно, увеличения давления наддува степень сжатия плавно понижается при повороте эксцентрикового вала. При этом максимальное давление сгорания ограничивается постоянным уровнем, предельно допустимым по условиям обеспечения работо-

способности подшипников силового механизма в дизеле, или отсутствия детонации в бензиновом двигателе.

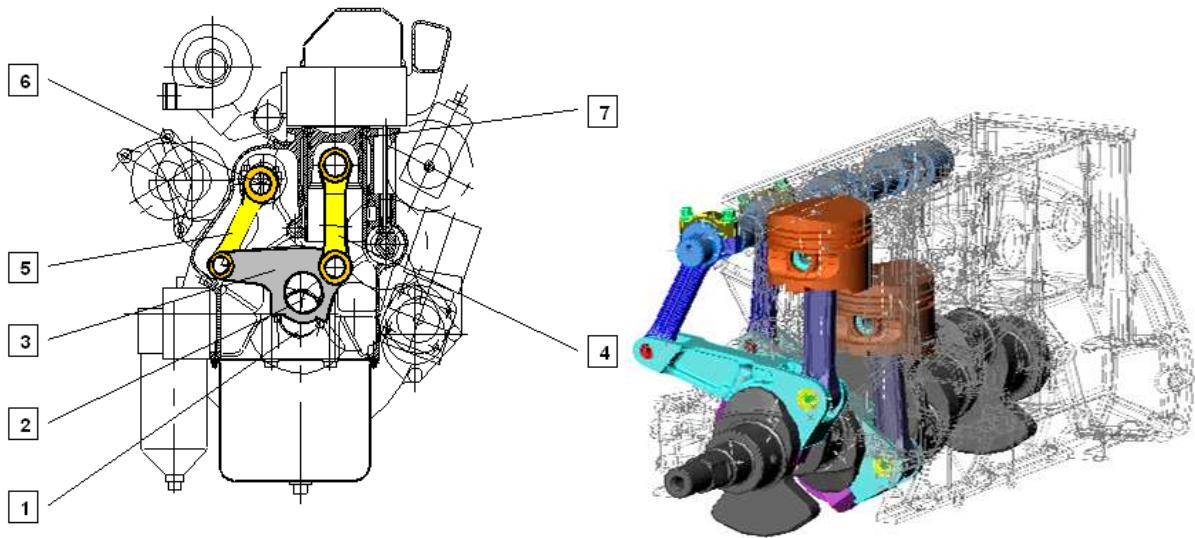
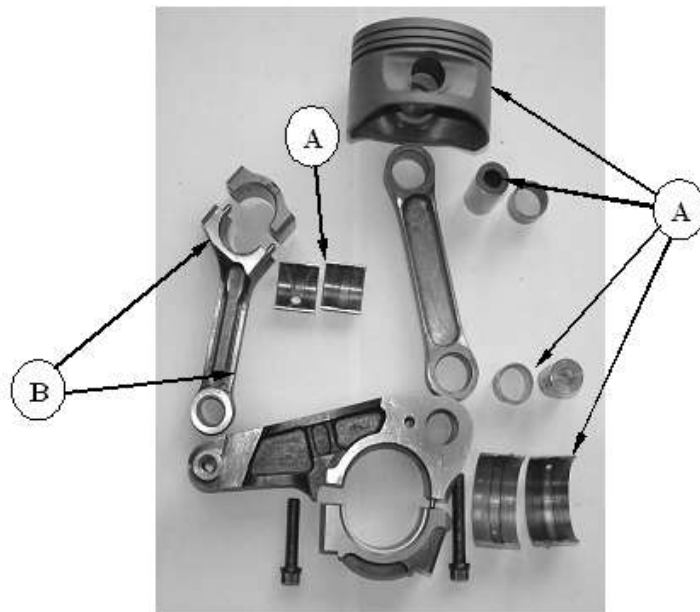


Рис. 5.5. Траверсный механизм двигателей НАМИ

Одной из главных задач, поставленных при создании траверсных двигателей, было обеспечение максимальной конструктивной, технологической преемственности и унификации с базовым двигателем.



*Рис. 5.6. Детали преобразующего механизма траверсного двигателя:
А – стандартные; В – дополнительные (изготовленные по стандартным технологиям и из традиционных материалов)*

Детали, узлы и агрегаты двигателя с управляемым движением поршней можно подразделить на три группы: стандартные, изменяемые и дополнительные (рис. 5.6) [19]. К группе стандартных относятся следующие изделия базового серийного двигателя: головка цилиндров, впускной и выпускной коллекторы, маховик, картер маховика, масляный поддон, крышки и вкладыши коренных опор коленчатого вала, масляный и водяной насосы, опоры двигателя, системы питания и зажигания, стартер, генератор.

Основной изменяемой деталью является блок цилиндров, имеющий конструктивную и технологическую преемственность с блоком цилиндров базового двигателя (рис. 5.7). В связи с тем, что межцилиндровое расстояние не меняется, обработка блока цилиндров может производиться на технологическом оборудовании серийного производства.

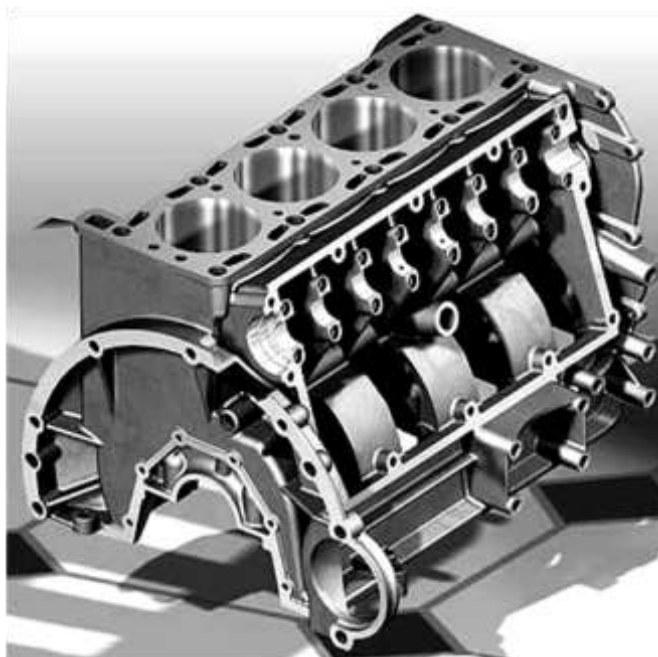


Рис. 5.7. Блок цилиндров траверсного двигателя

Коленчатый вал по конструкции и технологии изготовления унифицирован с коленчатым валом базового двигателя и отличается от последнего только уменьшенным радиусом кривошипа. Его

обработка производится так же на стандартном оборудовании. Сохранены длина вала, размеры коренных шеек, диаметр шатунных шеек, их координаты в продольном сечении. Сохранена также конструкция передней части вала и узла крепления маховика. Материал коленчатого вала такой же, как и у базового двигателя.

Дополнительными деталями траверсного двигателя являются элементы преобразующего механизма – траверсы, коромысла и эксцентриковый вал (рис. 5.6). Конструкция траверсы близка конструкции шатунов авиационных двигателей. Подшипник шатунной шейки коленчатого вала выполнен по аналогии с базовым двигателем. По конструктивному выполнению и применяемым материалам коромысло достаточно близко к шатунам традиционных двигателей. Верхняя и нижняя головки изготовленных шатунов идентичны верхней головке шатуна базового двигателя. Шатуны двигателя с управляемым движением поршней не имеют разъема в нижних головках и, поэтому, проще серийных. Технология изготовления эксцентрикового вала аналогична технологии изготовления распределительного вала обычного двигателя.

Конструкция траверсных двигателей позволяет их изготавливать параллельно с серийными двигателями в условиях действующего производства при частичном изменении стандартного оборудования.

Траверсный преобразующий механизм первоначально был разработан для двигателей с регулируемой степенью сжатия (Variable Epsilon – VE) и практически неизменным ходом поршня. Последующие работы, проводимые с конца 90-х годов прошлого столетия, были направлены на создание двигателя с регулируемой и рабочим объемом и степенью сжатия (Variable Displacement & Epsilon – VDE).

Используя многопараметровое оптимизационное моделирование, был разработан механизм VDE двигателя (рис. 5.8) [45]. При введении в конструкцию траверсного механизма некоторых изменений он может быть модифицирован в силовой механизм, позволяющий увеличивать рабочий объем двигателя на 40% при уменьшении степени сжатия в два раза.

В двигателях VE и VDE степень сжатия на режимах максимальной нагрузки понижается, позволяя повысить давление наддува без детонации. При этом 4-цилиндровые траверсные двигатели способны развивать такую же мощность, как и стандартный 6-цилиндровый двигатель. Кроме того, в двигателе VDE на режимах средних и малых нагрузок рабочий объем уменьшается на 24% и двигатель как бы трансформируется из 4-цилиндрового в 3-цилиндровый с соответствующим улучшением топливной экономичности.

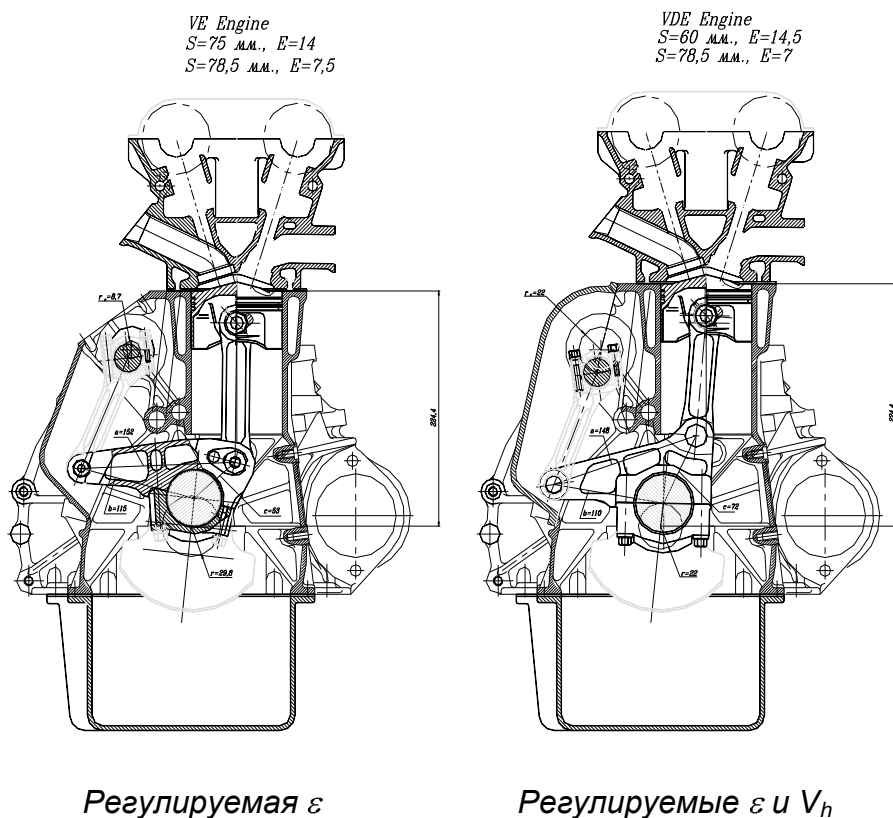


Рис. 5.8. Поперечные разрезы двигателей с регулируемым рабочим объемом и/или степенью сжатия

6. ГИБРИДНЫЕ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ С САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕМ ГОМОГЕННОГО ЗАРЯДА

Более ста лет бензиновые двигатели (двигатели, работающие по циклу Отто) и дизели успешно совершенствуются и развиваются, идя параллельными путями.

Основное преимущество дизельного рабочего процесса – высокие значения эффективного КПД, вследствие высокой степени сжатия и отсутствия потерь дросселирования при качественном регулировании мощности в отличие от количественного регулирования в бензиновых двигателях. С другой стороны, дизели имеют относительно низкую частоту вращения коленчатого вала, ограниченную интервалом времени, необходимого для осуществления процессов смесеобразования, воспламенения и сгорания. Гарантированное самовоспламенение гетерогенной рабочей смеси осуществляется в локальных зонах со стехиометрическим значением коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 1$, т.е. для самовоспламенения необходима гетерогенная смесь. В такой смеси в зонах с локальным значением коэффициента избытка воздуха $\alpha < 0,6$ выделяется значительное количество сажи, что является органическим недостатком дизельного рабочего процесса. Другим серьезным недостатком дизеля является высокий уровень эмиссии оксидов азота вследствие высоких температур сгорания.

Анализ показателей автомобилей с бензиновыми двигателям показывает, что их топливная экономичность и в городском режиме движения на 25–30% ниже, чем у дизельных автомобилей. Прогресс в топливной экономичности определяется меньшими на 14–15% индикаторным КПД и на 10–12% механическим КПД. Причиной более низкого механического КПД бензиновых двигателей по

сравнению с дизелями является принципиальные отличия в способах регулирования нагрузки. Если в дизелях применяется качественное регулирование, не вызывающее потерь энергии, то в бензиновых двигателях используется количественное регулирование, при котором снижение нагрузки осуществляется с помощью уменьшения расхода рабочего тела через двигатель посредством дросселирования. Процесс дросселирования сопровождается неизбежными затратами энергии.

На всех этапах развития двигателей предпринимались попытки создать «гибридный» рабочий процесс, объединяющий достоинства циклов Дизеля и Отто [46, 47]. В последнее десятилетие в этом направлении были достигнуты определенные успехи [48].

Во всех технически развитых странах, начиная с середины 90-х годов прошлого столетия, реализуются масштабные программы, как правило, государственные с участием ведущих автомобильных концернов по разработке новых рабочих процессов, основанных на технологии низкотемпературного сгорания топливовоздушной смеси (LTC – Low Temperature Combustion). Эта группа рабочих процессов широко известна как Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI), что означает «процессы воспламенения от сжатия однородной рабочей смеси» (табл. 6.1).

Разновидностью HCCI является технология контролируемого самовоспламенения гомогенного бензовоздушного заряда Controlled Auto-Ignition (CAI). Бензин, как известно, испаряется при более низких температурах, по сравнению с дизельным топливом. Однако, бензин менее склонен к самовоспламенению и самовоспламеняется при температурах смеси 1300–1500 К, что гораздо выше типичной температуры в конце процесса сжатия в бензиновых двигателях. Необходимое повышение температуры конца сжатия достигается с

помощью предварительного подогрева заряда на впуске, или рециркуляцией отработавших газов.

Таблица 6.1

Рабочие процессы с низкотемпературным сгоранием

Процесс	Аббре- виатура	Разработчик	Страна
Homogeneous Charge Compression Ignition	HCCI	<i>Southwest Research Institute (SwRI)</i>	США
Active Thermo-Atmosphere Combustion	ATAC	<i>Nippon Clean Engine Research Institute</i>	Япония
Toyota-Soken Combustion	TS	<i>Toyota</i>	Япония
Compression-Ignited Homogeneous Charge	CIHC	<i>University of Wisconsin-Madison</i>	США
Active radical combustion	ARC	<i>Honda</i>	Япония
Narrow Angle Direct Injection	NADI	<i>Institut Français Du Pétrole (IFP)</i>	Франция
Modulated Kinetics	M-fire	<i>Nissan</i>	Япония
Premixed Diesel Combustion	PREDIC	<i>New ACE Institute</i>	Япония
Multiple Stage Diesel Combustion	MULDIC	<i>New ACE Institute</i>	Япония
Homogeneous Charge Intelligent Multiple Injection Combustion System	HiMICS	<i>Hino</i>	Япония
Uniform bulky Combustion System	UNIBUS	<i>Toyota</i>	Япония
Homogeneous Combustion	HC	<i>Daimler-Benz</i>	Германия
Space Combustion	SPAC	<i>Daimler-Benz</i>	Германия
Controlled Autoignition	CAI	<i>Institut Français Du Pétrole (IFP)</i>	Франция
Homogeneous Charge Late Injection	HCLI	Различные организации	
Highly Premixed Late Injection	HPLI	Различные организации	
DiesOtto	DiesOtto	<i>DaimlerChrysler</i>	Германия
Premixed compression ignited combustion	PCI	<i>Mitsubishi</i>	Япония
Clean Diesel Combustion	CDC	<i>Environmental Protection Agency (EPA)</i>	США

Характерные признаки циклов Отто, Дизеля, процессов HCCI и CAI приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Характерные признаки различных рабочих процессов

Процесс	Цикл Отто	Цикл Дизеля
Смесеобразование	Внешнее	Внутреннее
Смесь	Гомогенная	Гетерогенная
Воспламенение	Принудительное	Самовоспламенение
Регулирование	Количественное	Качественное
Процесс	HCCI	CAI
Смесеобразование	Внутреннее	Внешнее
Смесь	Гомогенная	Гомогенная
Воспламенение	Самовоспламенение	Самовоспламенение
Регулирование	Качественное	Количественное

Принципиальное отличие процесса HCCI от традиционных рабочих процессов двигателей заключается в организации управляемого одновременного многоочагового воспламенения и горения заряда по всему объему камеры сгорания, а не во фронте пламени гомогенной или гетерогенной среды. В результате скорость тепловыделения значительно возрастает, процесс подвода теплоты к рабочему телу приближается к оптимальному с термодинамической точки зрения подводу теплоты при постоянном объеме, что в сочетании с высокой степенью сжатия, необходимой для самовоспламенения гомогенной смеси, обеспечивает высокий уровень индикаторного КПД.

Температура горения гомогенного заряда во всем объеме камеры сгорания, воспламеняемого от сжатия значительно ниже, чем температура во фронте пламени гомогенной смеси в двигателе с искровым зажиганием или в локальных зонах горения гетерогенной смеси в дизеле.

Оксиды азота термического происхождения, как известно, образуются при температуре выше 2000 К, а твердые частицы сажи в зонах обогащенной смеси при температурах выше 1400 К с локальным коэффициентом избытка воздуха менее 0,6–0,8. В рабочем процессе HCCI удастся избежать указанных значений параметров рабочего процесса, радикально улучшив экологические показатели двигателя.



Рис. 6.1. Три типа рабочих процессов

Реализация технологии HCCI позволяет многократно снизить концентрацию оксидов азота в отработавших газах и выбросы твердых частиц, с большим запасом обеспечивая выполнение перспективных экологических норм (рис. 6.1). Кроме того, низкотемпературное сгорание приводит к снижению тепловых потерь и уменьшению выбросов в атмосферу двуокиси углерода. Важным достоинством

двигателей НССІ является хорошая адаптивность к различным видам топлива (многотопливность).

Рабочий заряд в НССІ двигателях может быть очень бедным, расслоенным, разбавленным отработавшими газами или может быть применена комбинация этих свойств. Поскольку распространения пламени не требуется, уровень разбавления свежей смеси может быть много выше, чем в двигателях с искровым зажиганием и воспламенением от сжатия.

При реализации традиционных рабочих процессов ДВС момент воспламенения задается либо углом зажигания, либо, либо углом впрыска топлива. В рабочих процессах НССІ управление моментом воспламенения гомогенной смеси осуществляется за счет воздействия на химическую активность и температуру смеси.



Рис. 6.2. Методы управления процессом НССІ

Промышленную реализацию процесса НСЦИ сдерживают следующие проблемы:

- сложность организации управляемого момента воспламенения горючей смеси и стабильной работы двигателя на малых нагрузках;

- повышенные выбросы СО и СН (хотя эта проблема сравнительно легко решается применением окислительного нейтрализатора);

- ограничение жесткости работы на максимальных нагрузках;

- сложность управления двигателем особенно на переходных режимах.

Основным инструментом реализации процесса НСЦИ является быстросредействующая управляемая рециркуляция продуктов неполного сгорания топлива в сочетании с регулируемой степенью сжатия (рис. 6.2). Для этого необходимо иметь отработанные технические решения по сложным механизмам газораспределения, обеспечивающим управление фазами и подъемом клапанов в широких пределах и с высокой точностью.

Однако до последнего времени не существовало технических решений, позволяющих органично получать такую комбинацию параметров цикла – быстросредействующая рециркуляция и регулируемая степень сжатия. Регулируемую степень сжатия пока удалось осуществить в экспериментальных образцах двигателей только *Daimler AG* в двигателе *DiesOtto* (комбинация циклов Дизеля и Отто) и *Lotus Engineering* в двигателе *Omnivore* (лат. *omnivorus* – всеядный). Другие фирмы *General Motors*, *Volkswagen AG*, *Caterpillar* пытаются реализовать управляемое самовоспламенение от сжатия за счет оптимальной синхронизации в каждом отдельном такте параметров впрыскивания топлива, фаз и высоты подъема клапанов, а

также индивидуальные датчики давления в цилиндрах, которые контролируют процесс сгорания с целью организации плавных переходов между различными режимами сгорания.

Органическое сочетание быстродействующей управляемой рециркуляции с регулируемой степенью сжатия могло бы позволить существенно повысить гибкость и точность осуществления самовоспламенения гомогенной смеси. Такое сочетание обеспечивают преобразующие механизмы НАМИ. В ГНЦ ФГУП «НАМИ» на основе многолетнего опыта создания траверсных двигателей с регулируемой степенью сжатия разработан силовой механизм, позволяющий осуществлять независимое управление тактами двигателя (наполнение, сжатие, расширение, выпуск) и параметрами рабочего процесса (степень наполнения, степень сжатия, степень расширения, степень вытеснения).

В двигателе с управляемыми тактами может быть обеспечено:

- управление степенью сжатия и рабочим объемом;
- регулируемая внутрицикловая рециркуляция;
- продолженное расширение;
- бездрессельное регулирование наполнения;
- самонаддув.

Управление тактами дает возможность реализовать в двигателях принципиально новые рабочие процессы, такие как HCCI, а также при вариации типа топлива позволяет использовать различные сценарии управления двигателем, способствующие снижению эмиссии токсичных веществ. Применение технологии управления тактами значительно упрощает задачу создания многотопливного двигателя, способного одинаково эффективно работать на бензине, природном газе или спирто-бензиновой смеси. Наконец, управление

тактами открывает дорогу для внедрения новых и совершенствования существующих перспективных технологий двигателестроения: использования адаптивного цикла Аткинсона, формирования расслоенного заряда топливовоздушной смеси, сжигания сверхбедных смесей и ряда других.

Управление тактами позволяет осуществлять и другие альтернативные рабочие процессы, такие, как Controlled Auto Ignition (CAI) – управляемое самовоспламенение смеси, Highly Premixed Late Injection (HPLI) – частично гомогенный процесс сгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие «Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами» позволит студентам вузов, обучающимся по специальности 140501 «Двигатели внутреннего сгорания», получить научные знания в области нетрадиционных рабочих циклов ДВС, методов и устройств для реализации таких циклов.

Студенты получат возможность проводить анализ и выбирать оптимальные решения при проведении исследований двигателей нетрадиционных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тер-Мкртчян, Г.Г. Модифицирование рабочего цикла двигателей внутреннего сгорания. Разделенные такты / Г.Г. Тер-Мкртчян // Грузовик. – 2015. – № 3.– С. 2–6.

2. Тер-Мкртчян, Г.Г. Трансформация рабочего цикла ДВС при разделении и добавлении тактов / Г.Г. Тер-Мкртчян // Двигателестроение. – 2015.– № 3 (261).

3. URL: www.lindsaybks.com

4. Кушуль, В.М. Знакомьтесь, двигатель нового типа / В.М. Кушуль. – Л.: Судостроение, 1966. – 18 с.

5. URL: www.scuderigroup.com

6. URL: www.zajacmotors.com

7. URL: www.touengine.com

8. Musu E., Rossi R., Gentili, R. and Reitz, R.D. Clean Diesel Combustion by means of the HCPC Concept, SAE paper 2010-01-1256, SAE Int. J. Engines, Vol. 3. No.1. P. 964–981, 2010.

9. URL: www.diro-konstruktion.de

10. Тер-Мкртчян, Г.Г. Управление движением поршней в двигателях внутреннего сгорания / Г.Г. Тер-Мкртчян. – М.: Metallurgиздат, 2011. – 304 с.

11. Тер-Мкртчян, Г.Г. Диметиловый эфир – перспективы и проблемы / Г.Г. Тер-Мкртчян // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – № 4. – 2007. – С. 66–67.

12. Ailloud C., Delaporte B., Schmitz G., Keromnes A. et al. Development and Validation of a Five Stroke Engine, SAE Technical Paper 2013-24-0095, 2013, doi:10.4271/2013-24-0095.

13. Патент 6553977 В2 США, МКИ F02В 33/03. Five-Stroke Internal Combustion Engine / Shmitz G., 2003.

14. Тер-Мкртчян, Г.Г. Модифицирование рабочего цикла двигателей внутреннего сгорания. Добавленные такты / Г.Г. Тер-Мкртчян // Грузовик. – 2015. – № 4. – С. 2–6.

15. Дъяченко, В.Г. Двигатель с продолженным расширением – проблемы, перспективы / В.Г. Дъяченко // Грузовик. – 2008. – № 2. – С. 22–24.

16. Тер-Мкртчян, Г.Г. Двигатели с продолженным расширением рабочего тела / Г.Г. Тер-Мкртчян // Двигателестроение. – 2015. – № 2 (260). – С. 3–9.

17. Тер-Мкртчян, Г.Г. Повышение топливной экономичности двигателей ВАЗ за счет продолженного расширения рабочего тела / Г.Г. Тер-Мкртчян // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: www.science-education.ru/119-14605

18. Тер-Мкртчян, Г.Г. Двигатели с модифицированным рабочим циклом и продолженным расширением / Г.Г. Тер-Мкртчян // Труды НАМИ: сб. науч. ст. – М., 2014. – Вып. № 259. – С. 59–71.

19. Тер-Мкртчян, Г.Г. Двигатели ВАЗ – технический уровень и перспективы развития за счет регулирования степени сжатия / Г.Г. Тер-Мкртчян // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 10. – С. 17–19.

20. Патент 2007/0022977 А1 США, МКИ F01В29/04. Method and apparatus for operating an internal combustion engine / Crower H.B., 2007.

21. Патент 4809511 США, МКИ F02В75/02. Internal combustion engine / Bajulaz R., 1989.

22. URL: www.bajulazsa.com

23. URL: www.revelationpower.com

24. Osborne R.J., Stokes J., Lake T.H., Carden P.J., Mullinex J.D., Helle-Lorentzen R., Evans J.C., Heikal M.R., Zhu Y., Zhao H. and Ma T. Development of a Two-Stroke/Four-Stroke Switching Gasoline Engine – The 2/4SIGHT Concept. SAE Technical Paper Series, March 2005. Paper 2005-01-1137.

25. Патент 2529982 Российская Федерация, МПК F01L 1/04, F01L 1/38, F02D 13/02, F02B 69/06. Устройство привода клапана двигателя / А.А. Никитин, Г.Г. Тер-Мкртчян; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», опубл. 10.10.2014 бюл. № 28.

26. Патент 2520772 Российская Федерация, МПК F02B41/06, F02B33/06. Способ работы поршневого двигателя / Г.Г. Тер-Мкртчян, А.А. Никитин, А.В. Глатерман; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», опубл. 27.06.2014, бюл. № 18.

27. Патент 2521704 Российская Федерация, МПК F02B41/06. Комбинированный поршневой двигатель / Г.Г. Тер-Мкртчян, А.А. Никитин, А.В. Глатерман; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», опубл. 10.07.2014, бюл. № 19.

28. Патент 2520791 Российская Федерация, МПК F02B41/06, F02B33/06. Комбинированный четырехцилиндровый двигатель / Г.Г. Тер-Мкртчян, А.А. Никитин, А.В. Глатерман; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», опубл. 27.06.2014, бюл. № 18.

29. Тер-Мкртчян, Г.Г. Вопросы теории двигателей с управляемым движением поршней с плоскими преобразующими механизмами / Г.Г. Тер-Мкртчян, В.Ф. Кутенев, А.И. Яманин. – М.: Изд-во НАМИ, 2004. – 240 с.

30. Тер-Мкртчян, Г.Г. Научные основы создания двигателей с управляемой степенью сжатия: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004. – 323 с.

31. Патент РФ № 2030608 «Двигатель внутреннего сгорания» / Г.Г. Тер-Мкртчян, В.Ф. Кутенев, А.А. Никитин, заявка № 4787772/06 приоритет от 02.02.1990, опубликовано 1995.

32. Патент DE50102343D1 Германия, «Hubkolben-brennkraftmaschine mit variablem verdichtungsverhältnis» / Oleg Dachtchenko; Willi Gelse; Vadim Kutenev; Klaus Magg; Andrej Nikitin; Erhard Rau; Yuri Romanchev; Hubert Schnupke; George Ter-Mkrtichian; Michail Zlenro .19.09.2002.

33. US Patent №6772717 Reciprocating Piston Internal Combustion Engine / G. Ter-Mkrtichian et all. 08.08.2001/08.10.2004.

34. Европатент EP1307642B1. Internal Combustion Piston Engine / G. Ter-Mkrtichian et all. 03.06.2004.

35. Патент JP2004506117 (A) Япония, Internal combustion piston engine comprising various compression influences / G. Ter-Mkrtichian et all. 26.02.2004.

36. Патент 2256085 Российская Федерация, МПК F02D15/00, Поршневой двигатель внутреннего сгорания с переменной степенью сжатия / О. Дашенко, В. Гельзе, В. Кутенев, К. Магг, А. Никитин, Э. Рау, Ю. Романчев, Х. Шнупке, Г. Тер-Мкртчян, М. Зленко; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», приоритет от 08.08.2001, опубл. 07.10.2005.

37. Патент РФ № 2382217 «Поршневой двигатель с регулируемой степенью сжатия» / А.А. Никитин, Г.Г. Тер-Мкртчян, А.В. Гла-терман; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», приоритет 10.11.2008, опубл. 20.02.2010.

38. Патент 2394164 Российская Федерация, МПК F02B75/04, Поршневой двигатель с изменяемой степенью сжатия / А.А. Никитин, Г.Г. Тер-Мкртчьян, Г.Е. Седых; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», приоритет 15.12.2008, опубл. 10.07.2010.

39. Патент РФ на полезную модель № 81999 «Двигатель внутреннего сгорания с регулируемой степенью сжатия»/ Г.Г. Тер-Мкртчьян, А.А. Никитин, А.В. Глатерман, 10.04.2009.

40. Тер-Мкртчьян, Г.Г. Т-01 – дизель с управляемым движением поршней / Г.Г. Тер-Мкртчьян // Автомобильная промышленность. – 1992. – № 4. – С. 25–27.

41. Тер-Мкртчьян, Г.Г. Изменение параметров камеры сгорания в двигателе с управляемым движением поршней / Г.Г. Тер-Мкртчьян // Проблемы конструкции двигателей и экология: сб. науч. тр. НАМИ. – 1999. – Вып. 224. – С. 39–60.

42. Тер-Мкртчьян, Г.Г. Анализ возможностей снижения механических потерь в траверсном двигателе DaimlerChrysler VE111 с регулируемой степенью сжатия / Г.Г. Тер-Мкртчьян // Автомобили и двигатели: сб. науч. тр. НАМИ. – 2002. – Вып. 230. – С. 46–57.

43. Тер-Мкртчьян, Г.Г. Экспериментально-аналитическое исследование механических потерь в двигателе внутреннего сгорания / Г.Г. Тер-Мкртчьян // Автомобили и двигатели: сб. науч. трудов НАМИ. – 2002. – Вып. 230. – С. 86–98.

44. Ter-Mkrtichian, G.G. New Generation of Engines with Controlled Pistons Movement for Reconfigurable Manufactures (Chapter 25) / G.G. Ter-Mkrtichian // Reconfigurable Manufacturing Systems. – Springer-Verlag, Berlin, 2006. – P. 519–533.

45. Яманин, А.И. Интегрированные системы автоматизированного проектирования: учеб. пособие / А.И. Яманин, В.Ф. Кутенев, Г.Г. Тер-Мкртчян. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2011. – 76 с.

46. Тер-Мкртчян, Г.Г. Новые возможности воздействия на рабочий процесс двигателя за счет управления движением поршней / Г.Г. Тер-Мкртчян // Проблемы конструкции двигателей. – М.: Издательство НАМИ, 1998. – С. 79–90.

47. Тер-Мкртчян, Г.Г. Рабочий процесс с комбинированным смесеобразованием – подходы к созданию гибридного двигателя / Г.Г. Тер-Мкртчян // Проблемы конструкции двигателей и экология. – М., Издательство НАМИ, 2001. – С. 65–88.

48. Нагайцев, М.В. «Гибридные» рабочие процессы в ДВС с самовоспламенением гомогенной смеси / М.В. Нагайцев // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 12. – С. 4–6.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС.	4
2. ДВИГАТЕЛИ С РАЗДЕЛЕННЫМИ ТАКТАМИ	7
Двигатель Кушуля	9
Двигатель Скудери	11
Двигатель <i>ZajacMotors</i>	12
Двигатель <i>TourEngine</i>	13
Разделенный цикл с рабочим процессом НСРС	14
Двигатель <i>DIRO Konstruktion</i>	15
3. ДВИГАТЕЛИ С ДОБАВЛЕННЫМИ ТАКТАМИ	20
Пятитактный двигатель <i>ILMOR</i>	21
Реализация пятитактного цикла в двигателях традиционной конструкции.....	24
Шеститактные двигатели	33
Двигатель Кроуэра.....	33
Двигатель Баюласа	36
Двигатель <i>Revelation Power</i>	38
4. ДВИГАТЕЛИ С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОМБИНАЦИЕЙ ТАКТОВ	42
Двигатель или двигатель-эспандер (ДЭ).....	48
Двигатель-компрессор или двигатель-эспандер (ДК или ДЭ)	50
5. ДВИГАТЕЛИ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ И РАБОЧИМ ОБЪЕМОМ	53
6. ГИБРИДНЫЕ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ С САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕМ ГОМОГЕННОГО ЗАРЯДА.....	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
ЛИТЕРАТУРА.....	73

Учебное издание

ТЕР-МКРТИЧЬЯН Георг Георгович

**ДВИГАТЕЛИ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
С НЕТРАДИЦИОННЫМИ
РАБОЧИМИ ЦИКЛАМИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор Т.А. Феоктистова

Подписано в печать 22.10.2015 г. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 5,0. Тираж 300 экз. Заказ . Цена 165 руб.
МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64.