

## ТРАНСФОРМАЦИЯ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ И ДОБАВЛЕНИИ ТАКТОВ

Г.Г. Тер-Мкртчян, д.т.н., профессор  
ГНЦ РФ ФГУП НАМИ

Рассмотрены возможности трансформации рабочего цикла двигателей внутреннего сгорания. Дана классификация направлений и методов трансформирования циклов. Подробно рассмотрены циклы с разделенными в пространстве тактами и циклы 5-, 6- и 8-тактных двигателей.

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.

Совершенствование 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.

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.

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

На рис. 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.

В двигателях с модифицированным рабочим циклом такты могут совместно осуществляться не в одном, а в двух, или более цилиндрах. По-

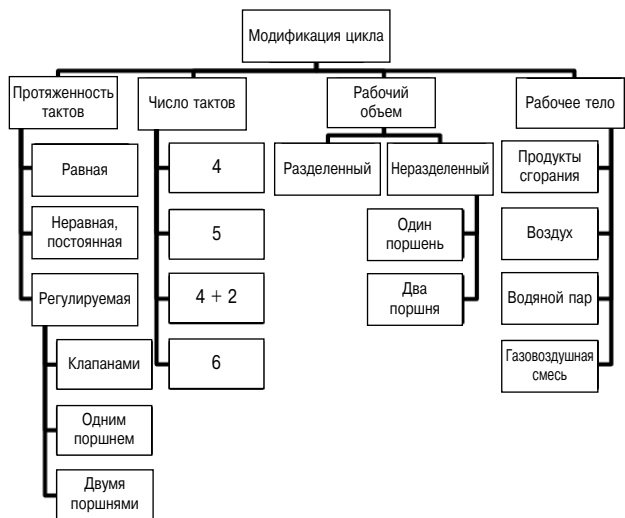


Рис. 1. Классификация модифицированных рабочих циклов ДВС

этому тактом будем называть часть рабочего цикла при изменении объема модуля от минимального до максимального значения. Такты могут быть равной и неравной протяженности.

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

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

**Вытеснение** — удаление выпускных газов или воздуха из одного цилиндра в другой цилиндр двигателя для дополнительного расширения.

**Расширение** — рабочий ход, в котором имеется процесс расширения, но отсутствует процесс сгорания.

**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 рис. 2 представлены основные направления и методы модифицирования рабочего цикла ДВС. Рассмотрим подробнее двигатели с разделенными и добавленными тактами.

### 1. Двигатели с разделенными тактами

В традиционном цикле такты разнесены во времени, при разделенном цикле такты разделены в пространстве и осуществляются в разных объемах.

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 также недостаточно. При частоте вращения коленчатого вала 4800 об/мин (80 об/с), характерной для высокооборотных дизелей легковых автомобилей четыре такта (два оборота коленчатого вала), происходят за  $2/80 = 0,025$  с (25 мс). Смесеобразование осуществляется приблизительно за  $20^\circ$  поворота коленчатого вала или за 0,7 мс ( $20/360 \times 80 = 0,0007$  с). При частоте вращения коленчатого вала 350–550 об/мин, характерной для среднеоборотных судовых дизелей, на смесеобразование отводится на порядок больше времени, а именно 6–10 мс, что определяет

<b>Разделение</b>	• Разделение тактов между рабочими объемами
<b>Добавление</b>	• Добавление дополнительных тактов
<b>Вариация</b>	• Изменение протяженности тактов • Использование тактов не равной протяженности
<b>Комбинирование</b>	• Комбинирование циклов с разными тактами

Рис. 2. Направления и методы модифицирования рабочего цикла

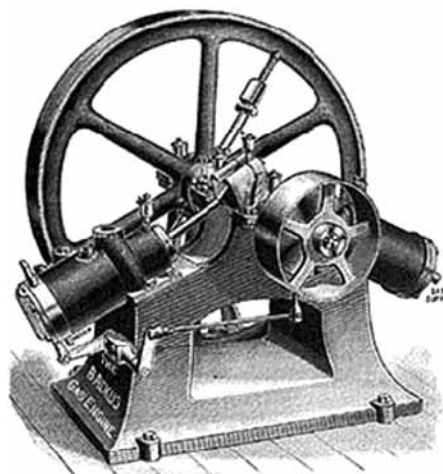
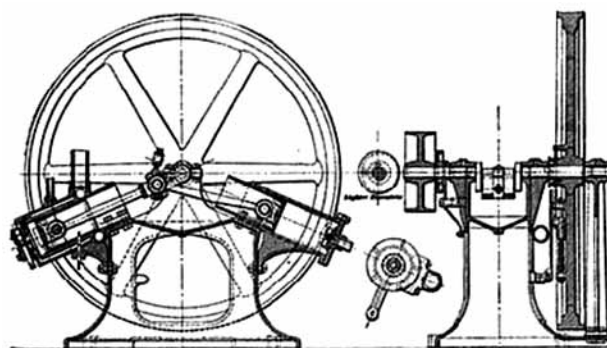


Рис. 3. Двигатель «Backus Water Motor Company»

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.

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. 3) [1].

#### Двигатель Кушуля

В 60-х гг. 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 [2]. Движение поршней происходит с некоторым сдвигом по фазе. Поршень второго цилиндра отстает на 22–24° по углу поворота коленчатого вала от поршня первого, что достигается особым расположением цапфы прицепного шатуна (рис. 4).

Степень сжатия в первом цилиндре равна 7, как в двигателях с искровым воспламенением, а во втором — 21. При этом степень сжатия, общая для блока из двух цилиндров, 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 значительная часть воздушного заряда из второго цилиндра перетекает в первый цилиндр. Воспламенение смеси в первом цилиндре осуществля-

ется от электрической искры за 10–12° 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, несмотря 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 выталкиваются из цилиндров.

Несмотря 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

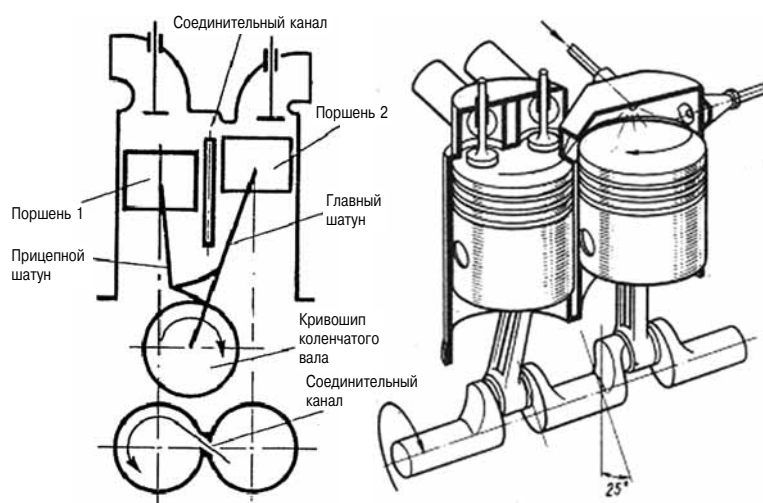


Рис. 4. Двигатель В.М. Кушуля

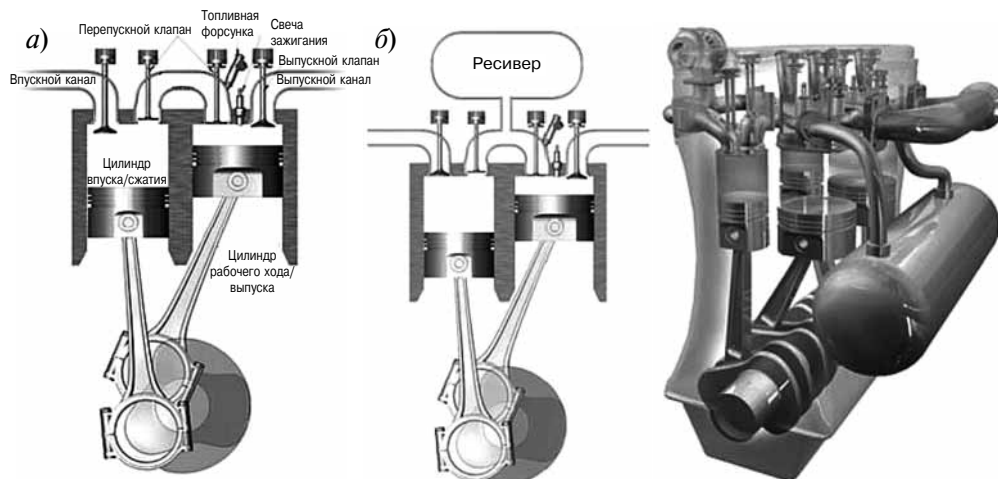


Рис. 5. Двигатель Скудери:  
а — схема двигателя; б — двигатель с ресивером

«Scuderi Group» (США) изобретателя К. Скудери, предложившего термин Split-Cycle Combustion (SCC) [3]. 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. 5).

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 в последствии 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 Zajac Motors

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 [4].

Сжатие воздушного заряда производится в одном цилиндре, а расширение — в другом (рис. 6). 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.

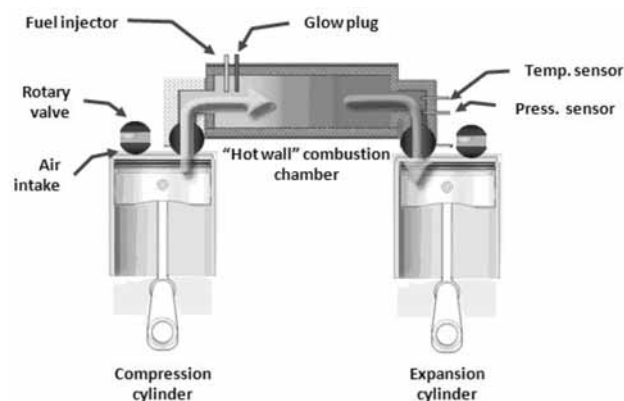


Рис. 6. Схема двигателя Zajac Motors

#### Двигатель TourEngine

Схема двигателя, разработанного Х. Туром («TourEngine Inc.», США) [5], близка к схеме двигателя Скудери. Модуль двигателя TourEngine

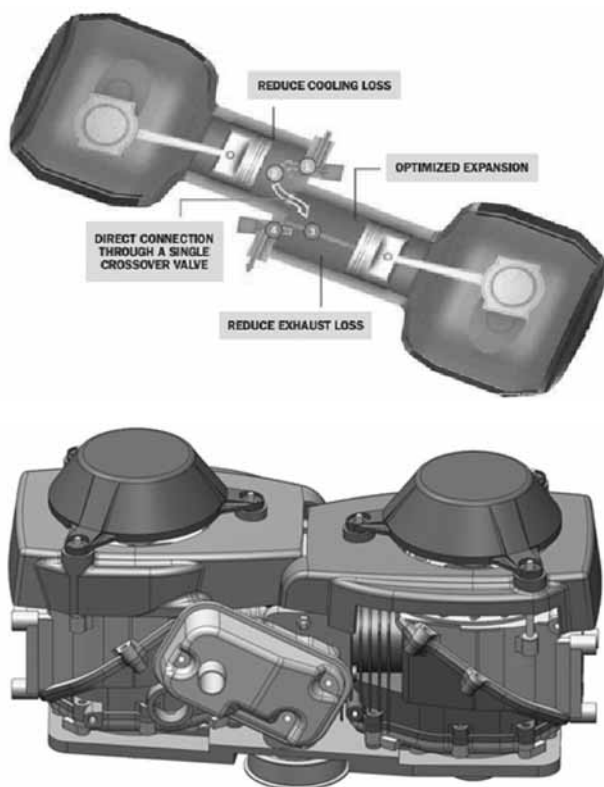


Рис. 7. Двигатель TourEngine

состоит из двух оппозитно 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. 7).

Рабочий объем «холодного» цилиндра  $95 \text{ см}^3$  в два раза меньше, чем у «горячего» цилиндра  $190 \text{ см}^3$ . 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.

#### Разделенный цикл с рабочим процессом НСРС

Группа ученых из университетов Пизы (Италия) и Мэдисона (США) на базе двигателя с разделенным циклом разрабатывают концепцию «Homogenous Charge Progressive Combustion» (НСРС), являющуюся разновидностью рабочего процесса с самовоспламенением гомогенной смеси НССН [6]. 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

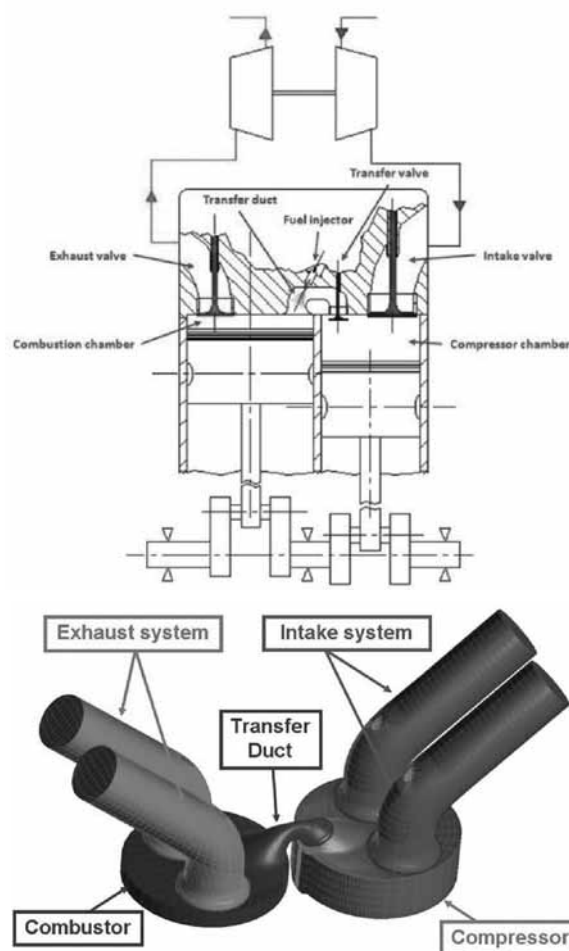


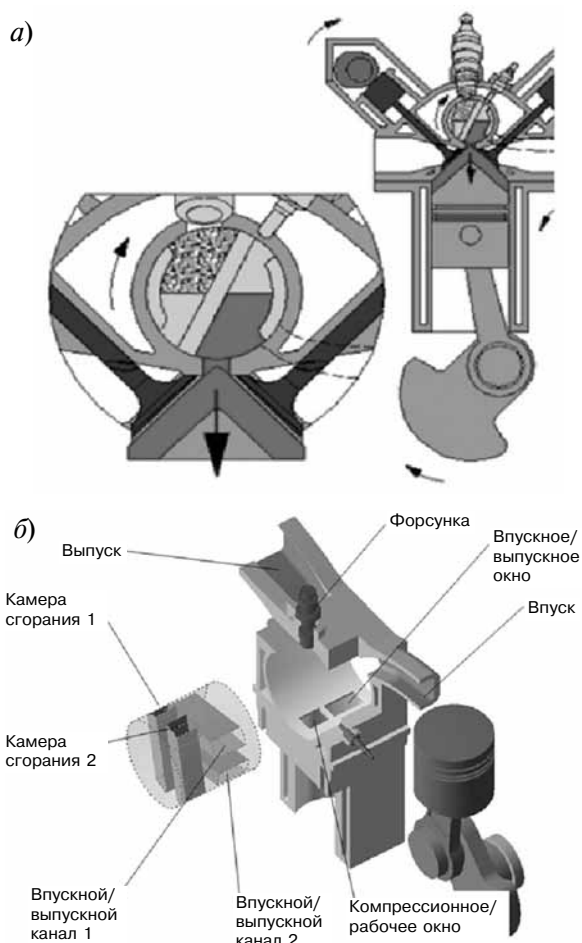
Рис. 8. Двигатель с процессом НСРС

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. 8).

Подобранные специальным образом размеры и конфигурация перепускного канала позволяют обеспечить очень высокую скорость перетекания через него воздушного заряда (более  $200 \text{ м/с}$ ) и получение гомогенной топливно-воздушной смеси (рис. 8).

#### Двигатель DIRO Konstruktion

Наиболее радикально процесс сгорания отделен от других составляющих рабочего цикла в двигателе, предложенном немецкой фирмой DIRO Konstruktion [7]. В головке цилиндра двигателя размещен вращающийся золотник, содержащий две камеры сгорания, попеременно сообщающиеся с рабочей полостью цилиндра. Камеры сгорания с интервалом в  $180^\circ$  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 обеспечи-



**Рис. 9. Двигатель DIRO**

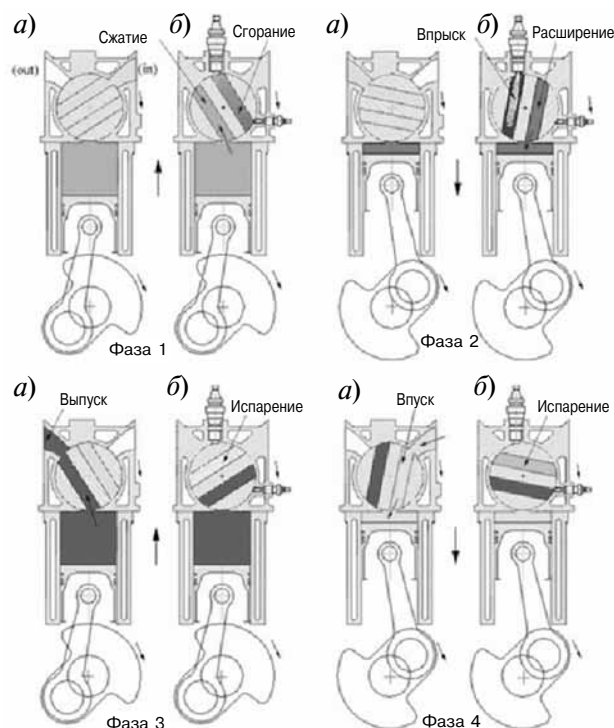
*a* — комбинированное газораспределение; *б* — золотниковое газораспределение

вается 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. 9).

На рис. 10 показаны фазы рабочего цикла двигателя DIRO в дизельном варианте.

Во время 1-й фазы 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 2-й фазы 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 3-й и 4-й фаз рабочего цикла осуществляются такты выпуска и впуска, а первая и вторая камеры сгорания функционально меняются местами.



**Рис. 10. Фазы рабочего цикла двигателей DIRO**

*a* — 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.

## 2. 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. Рассмотрим более подробно примеры двигателей с добавленными тактами.

### Пятитактный двигатель

Английская компания Ilmor Engineering, известная своими двигателями для гоночных автомобилей, представила на выставке EXPO 2009 в Штутгарте двигатель, названный пятитактным [8]. За основу конструкции двигателя приняты технические решения патента 2003 г. бельгийского изобретателя Герхарда Шмитца (Gerhard Schmitz) [9]. 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 лишённого присущего последним недостатка в виде повышенной эмиссии оксидов азота и сажи.

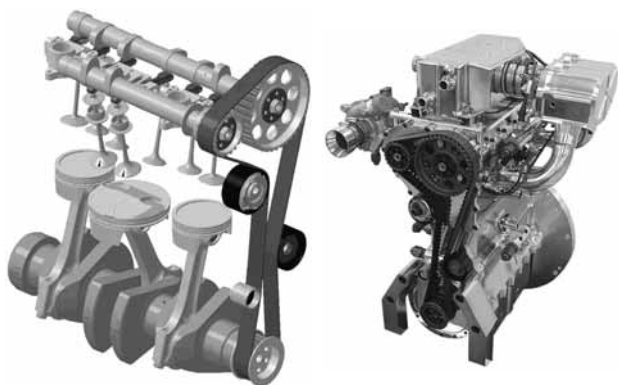


Рис. 11. Двигатель ILMOR Engineering

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. 11). Рабочий объем цилиндра высокого давления составляет  $350 \text{ см}^3$ , а рабочий объем цилиндра низкого давления равен  $778 \text{ см}^3$ . Геометрическая степень сжатия, она же степень расширения, в цилиндрах высокого давления равна 8, а степень расширения в цилиндре низкого давления равна 30. При этом общая степень расширения в двигателе составляет 30.

Опытный образец двигателя имеет максимальные мощность и крутящий момент соответственно  $96 \text{ кВт}/7000 \text{ об/мин}$  и  $166 \text{ Нм}/5000 \text{ об/мин}$ . При этом минимальная величина удельного эффективного расхода топлива равна  $226 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ , что значительно ниже, чем у лучших современных аналогов. Давление наддува составляет  $0,5 \text{ МПа}$ .

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.

Рабочий процесс пятитактного двигателя состоит из четырех фаз (рис. 12, таблица).

**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 дви-

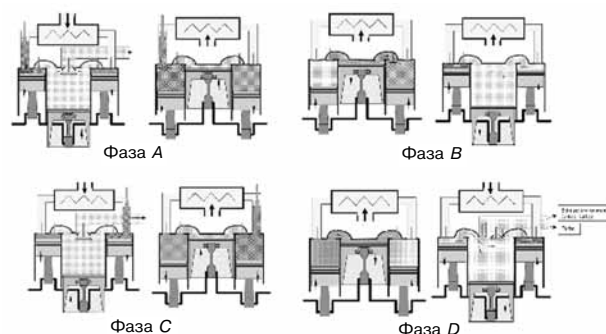


Рис. 12. Фазы рабочего процесса пятитактного двигателя

жется от ВМТ к НМТ. В первом цилиндре 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.

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

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

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.

#### Последовательность такта рабочего цикла

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

### 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 [10]. 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. 13. Строго говоря, цикл двигателя Кроуэра состоит из четырехтактного и двухтактного циклов (4+2).

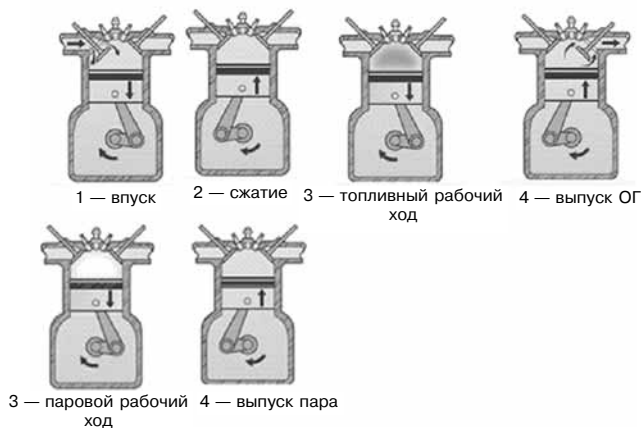


Рис. 13. Последовательность тактов двигателя Кроуэра

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.

#### Двигатель Баюласа

Двигатель Баюласа разработан в компании Bajulaz S A (Швейцария). Схема двигателя представлена на рис. 14 [11].

В двигателе Баюласа реализован рабочий процесс с воспламенением от сжатия. В головке цилиндра размещены камера сгорания *b* и камера

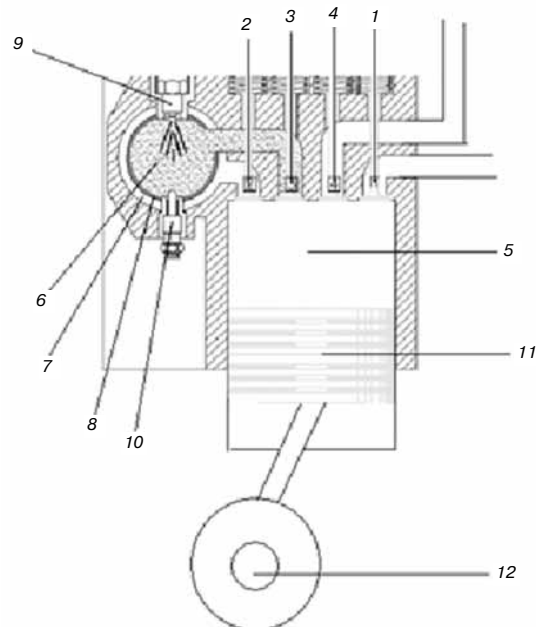


Рис. 14. Схема двигателя Баюласа:

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 накала; 11 — поршень; 12 — коленчатый вал



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.

Последовательность тактов в двигателе Баюласа дана на рис. 15:

- на такте впуска открыт только впускной клапан, и воздух поступает в цилиндр;

- во время такта первого 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;

- во время топливного рабочего хода при открытом клапане камеры сгорания газы из последней перетекают в цилиндр, в котором расширяются;

- 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;

- нагретый сжатый воздух из камеры нагрева поступает в цилиндр, расширяясь в котором совершает полезную работу;

- расширившийся воздух сжимается, поступая в камеру сгорания для последующего использования в топливном рабочем ходе (второе сжатие).

Утилизация теплоты отработавших газов способствует повышению топливной экономичности

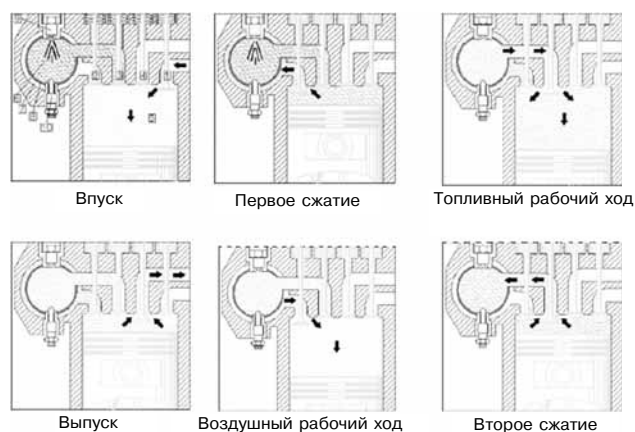


Рис. 15. Последовательность тактов в двигателе Баюласа

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. 16) [12].

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 выпускной клапан — для удаления отработавших газов. Рабочий цикл двигателя осуществляется за два оборота коленчатого вала.

Последовательность тактов рабочего цикла двигателя Revelation Power показана на рис. 16.

**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-воздуш-

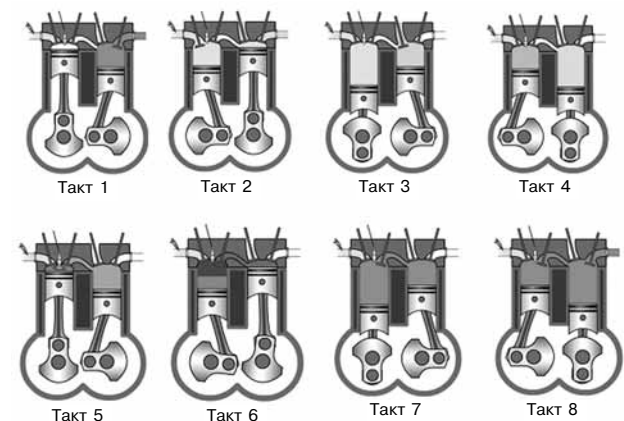


Рис. 16. Последовательность тактов рабочего цикла двигателя Revelation Power

ной 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.

#### Заключение

Трансформация 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. Добавление дополнительных тактов при прочих равных условиях неизбежно приводит к снижению литровой мощности двигателя. Использование в двигателе нетрадиционных компонентов рабочего тела, таких как вода, требует изменения номенклатуры материалов и, возможно, конструкции деталей, ограничивающих камеру сгорания. Указанные проблемы препятствовали промышленному применению двигателей с трансформированным рабочим циклом.

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 оп-

тимальному 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 [13].

Трансформация 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 [14]. Разделение и добавление тактов может позволить осуществлять и другие альтернативные рабочие процессы, такие как Controlled Auto Ignition (CAI) — управляемое самовоспламенение смеси, Highly Premixed Late Injection (HPLI) — частично гомогенный процесс сгорания.

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

#### Литература

1. Материалы сайта [www.lindsaybks.com](http://www.lindsaybks.com).
2. Кушуль В.М. Знакомьтесь, двигатель нового типа. — Л. : Судостроение, 1966.— 118 с.
3. Материалы сайта [www.scuderigroup.com](http://www.scuderigroup.com)
4. Материалы сайта [www.zajacmotors.com](http://www.zajacmotors.com)
5. Материалы сайта [www.tourenge.com](http://www.tourenge.com)
6. 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, № 1. — P. 964–981, 2010.
7. Материалы сайта [www.diro-konstruktion.de](http://www.diro-konstruktion.de)
8. 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.
9. Пат. 6553977 В2 США, МКИ F02B 33/03. Five-Stroke Internal Combustion Engine / Shmitz G., 2003.
10. Пат. 2007/0022977 А1 США, МКИ F01B29/04. Method and apparatus for operating an internal combustion engine / Crower H.B., 2007.
11. Материалы сайта [www.bajulazsa.com](http://www.bajulazsa.com)
12. Материалы сайта [www.revelationpower.com](http://www.revelationpower.com)
13. Тер-Мкртчян Г.Г. Управление движением поршней в двигателях внутреннего сгорания. — М. : Металлургиздат, 2011. — 304 с.
14. Тер-Мкртчян Г.Г. Диметиловый эфир — перспективы и проблемы // АвтоГазоЗаправочный Комплекс + альтернативное топливо. — 2007. № 4, — С. 66–67.