

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

© 2007 Е. В. Беляева, М. Ю. Орлов, Д. А. Угланов

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье рассмотрены основные пути совершенствования рабочего процесса в двигатели внутреннего сгорания, используемые зарубежными фирмами – производителями двигателей. Выделены основные направления работ, описаны серийные конструктивные схемы с указанием их преимуществ.

Основные задачи, решаемые при проектировании современных бензиновых и дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) - это повышение топливной экономичности и снижение токсичности отработавших газов. Обе эти задачи решаются в основном за счет совершенствования рабочего процесса.

С точки зрения общей конструкции бензиновый и дизельный двигатель мало, чем отличаются друг от друга, так как оба состоят из цилиндров, поршней, шатунов и т.д. Правда, детали дизельного двигателя существенно усилены, чтобы воспринимать более высокие нагрузки, так как степень сжатия у него намного выше (19...24 против 9-11 у бензинового). Долгое время считалось, что принципиальное отличие этих двигателей заключается в способах формирования топливно-воздушной смеси, ее воспламенения и сгорания. Если у бензинового двигателя смесь образуется во впускной системе, а в цилиндре воспламеняется от искры свечи зажигания, то в дизельном двигателе подача топлива и воздуха происходит раздельно: в цилиндры поступает чистый воздух, а в конце сжатия в камеру сгорания форсунками под большим давлением впрыскивается топливо, которое самовоспламеняется от контакта с нагретым до 700-800 °С воздухом. Этот процесс сопровождается резким нарастанием давления в цилиндре - отсюда повышенная шумность и жесткость работы дизеля. Такая организация рабочего процесса позволяет

использовать более дешевое топливо и работать на очень бедных смесях, что определяет высокую экономичность. По экологическим характеристикам дизельный двигатель также несколько превосходит бензиновый: при работе на бедных смесях выбросы вредных веществ, особенно оксида углерода заметно ниже. К характерным недостаткам дизельных двигателей обычно относят повышенную шумность и вибрацию, меньшую литровую мощность и трудности холодного пуска. Однако в современных конструкциях эти проблемы в основном уже решены.

С точки зрения конструкции камеры сгорания существует несколько типов дизельных двигателей: с неразделенной и разделенной конструкцией камеры сгорания. В первых, называемых также дизелями с непосредственным впрыском (рис. 1), топливо впрыс-



Рис. 1. Камера сгорания дизеля с непосредственным впрыском
1-форсунка; 2-свеча накаливания; 3-камера сгорания

кивается в надпоршневое пространство, а камера сгорания выполнена в поршне.

Наиболее распространенными долгое время были дизели с разделенной камерой сгорания. В них впрыск топлива осуществляется не прямо в цилиндр, а в дополнительную камеру. Такие камеры часто выполнялись с вихревой закруткой потока (рис. 2). Они выполнялись в головке блока цилиндров и соединялись с цилиндром специальным каналом. При сжатии воздух попадал в вихревую камеру и интенсивно закручивался, что улучшало процесс смесеобразования. Самовоспламенение начиналось в вихревой камере, а затем продолжалось в основной камере сгорания. Применение разделенной камеры сгорания позволяло снизить темп нарастания давления в цилиндре, что способствовало снижению шумности и повышению максимальных оборотов.

Предкамерные дизели (рис. 3) имеют специальную форкамеру, соединенную с цилиндром несколькими небольшими каналами, форма и сечение которых подбирались таким образом, что между цилиндром и форкамерой возникал большой перепад давления, вызывающий течение газов с большой скоростью. Такая конструкция позволяла увеличить ресурс, снизить уровень шума и токсичности, а также обеспечить пологую характеристику крутящего момента.

Таким образом, в дизелях с неразделенной камерой в процессе смесеобразования

топливо равномерно распределяется по камере сгорания за счет большого числа струй. Для конструкции с камерой сгорания в поршне характерно пленочное смесеобразование, когда топливо подается на стенку камеры и его пары, попадая в вихрь воздуха, хорошо с ним перемешиваются. В вихрекамерных дизелях поток воздуха закручивается при вытеснении его в вихревую камеру в процессе сжатия, а топливо впрыскивается в быстро вращающийся вихрь. В предкамерных дизелях смесеобразование осуществляется вследствие поступления воздуха и топлива из предкамеры в основную камеру, вызванного начавшимся сгоранием и повышением давления в предкамере.

Работы по совершенствованию дизелей привели к тому, что в Европе этот тип двигателей используется на более, чем на 40 % автомобилей. В некоторых странах (Австрия, Бельгия, Франция) таких автомобилей более половины. Такой рост применения дизелей объясняется их использованием не только на грузовиках, но и на легковых автомобилях. Поскольку вторые отличаются более высокими динамическими качествами, то это стало возможным с переходом от предкамерных дизелей на двигатели с неразделенной камерой сгорания (впервые на легковом автомобиле «Фольксваген», 1996 г.). Долгое время непосредственный впрыск применялся только в низкооборотных дизелях большого рабочего объема, что объяснялось трудностями

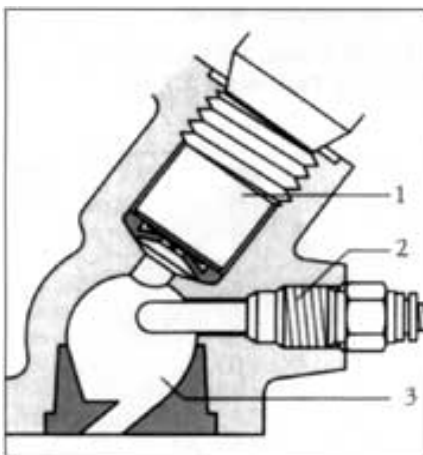


Рис. 2. Вихрекамерный дизель
1 - форсунка; 2 - свеча накаливания;
3 - камера сгорания

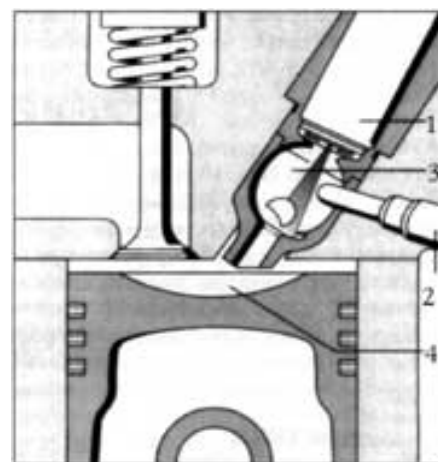


Рис. 3. Предкамерный дизель
1 - форсунка; 2 - свеча накаливания;
3 - форкамера; 4 - камера сгорания

ми организации процесса сгорания, а также повышенными шумом и вибрацией. В последние годы, благодаря появлению топливных насосов высокого давления (ТНВД) с электронным управлением и двухступенчатого впрыска топлива, удалось оптимизировать процесс сгорания в таких двигателях в результате удалось получить устойчивую работу на частоте оборотов коленчатого вала свыше 4000 об/мин, улучшить экономичность и снизить шум и вибрацию. На дизелях с непосредственным впрыском стали использовать двухфазный впрыск, в котором топливо подавалось двумя дозами: пилотной и основной. За счет этого удалось оптимизировать задержку самовоспламенения и снизить жесткость работы двигателя. С точки зрения систем питания дизелей с непосредственным впрыском четко выражены два направления: использование насос-форсунок и применение накопительных магистралей (так называемый «коммон рейл»). Первые обеспечивают точное дозирование за счет высокого давления впрыска (до 205 МПа), вторые - при несколько меньших давлениях (порядка 160 МПа) - лучшее управление самим процессом впрыска. В насос-форсунках закон впрыска определяется сечением каналов и жесткостью пружин, изменять можно только начало впрыска и количество подаваемого топлива. В системах «коммон рейл» открытием форсунок управляют соленоиды, что позволяет ускорить открытие форсунки и впрыснуть топливо за меньший промежуток времени (с учетом дальнейшего роста давления в пер-

спективных системах). Тем самым можно улучшить экологические характеристики дизеля. Таким образом, топливная аппаратура в современных дизелях практически определяет уровень их мощностных и экологических характеристик.

В конце 20 века появились и бензиновые двигатели с системой непосредственного впрыска бензина в цилиндры (например система GDI фирмы «Мицубиси», рис. 4). Впрыск бензина прямо в цилиндр позволяет управлять распределением топлива в камере сгорания, увеличивает быстроту реагирования двигателя на управляющее воздействие и обеспечивает сгорание очень бедной топливовоздушной смеси (достигается стабильное сгорание сверх бедной топливовоздушной смеси в соотношении до 40:1, тогда как топливовоздушное соотношение для нормальной системы распределенного впрыска топлива составляет от 12,5 до 15:1).

Для формирования необходимого распределения топлива по камере сгорания в системе GDI используется углубление в днище поршня, которое направляет смесь топлива с воздухом дальше к свече зажигания в виде послойной топливовоздушной смеси. При этом облако топливовоздушной смеси с оптимальным для воспламенения соотношением располагается около свечи зажигания, и от него легко воспламеняется бедная топливовоздушная смесь на всем пространстве камеры сгорания. Сжигание обедненной топливовоздушной смеси позволяет значительно снизить расход топлива как на холостом

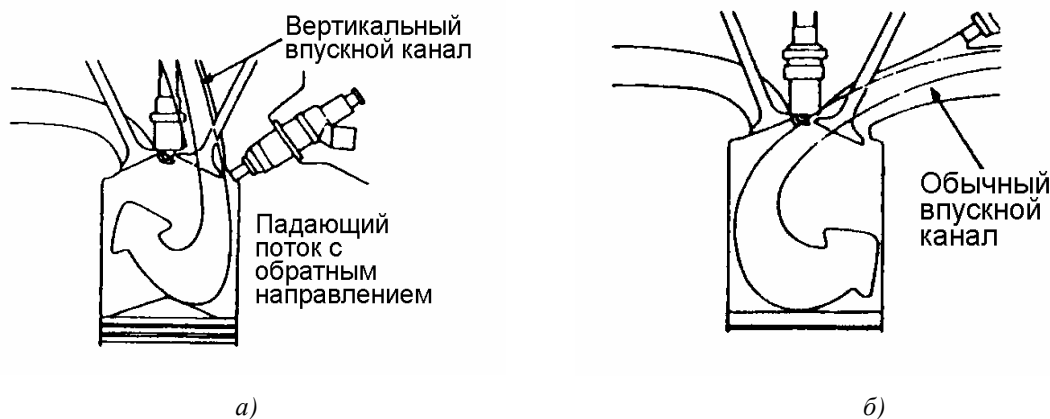


Рис. 4. Распределение топливовоздушной смеси в системе GDI (а) и при обычном впрыске (б)

ходу (до 40 %), так и при движении с постоянной скоростью (20 – 25 % на скоростях до 100 км/ч).

В системе GDI положительную роль также играет эффект охлаждения камеры сгорания на впуске. Это позволяет несколько повысить мощность двигателя за счет лучшей объемной эффективности и более высокой степени сжатия (12 за счет того, что эффект охлаждения предотвращает появление детонации). Подобные принципы были также реализованы в двигателях FSI фирмы «Фольксваген». Однако такие двигатели оказались очень требовательны к качеству топлива, а обедненные режимы - неэффективны в условиях европейских дорог.

Одной из последних новинок в области бензиновых ДВС являются новые моторы с непосредственным впрыском фирмы «Мерседес-Бенц» (технология HCCI, заявленное начало производства - 2009 год). В этих двигателях используется концепция «контролируемого самовоспламенения». В большинстве ранее использовавшихся камер сгорания бензиновых ДВС был ярко выражен фронт пламени. В новых двигателях при сжатии топливовоздушной смеси до температуры воспламенения возгорание происходит не в одной точке, а сразу по всему объему (технология HCCI предусматривает воспламенение топливовоздушной смеси в цилиндре путем ее сжатия). Так как в отличие от искрового зажигания, а также от процесса сгорания в дизельном двигателе, технология HCCI позволяет реализовать высвобождение энергии топлива при низкотемпературном сгорании смеси сразу во всем объеме камеры сгорания, то все топливо, находящееся в цилиндре, сгорает одновременно. Данный процесс позволяет получить ту же мощность, что и у обычного бензинового двигателя, при меньшем расходе топлива. Механизм получения однородной смеси при непосредственном впрыске не раскрывается. Заявлено, что двигатель также оснащен турбонаддувом и системой изменения фаз газораспределения. На прототипе при рабочем объеме 1,8 л получена мощность 238 л.с. и расход топлива 6 л на 100 км.

Для рабочего процесса системы HCCI необходима относительно высокая темпера-

тура двигателя. Поэтому в период прогрева холодного двигателя используется обычное искровое зажигание. В режиме HCCI используется обедненная смесь, поэтому КПД такого бензинового двигателя оказывается близким к КПД дизеля, но при этом для очистки отработавших газов можно использовать только традиционные устройства (для дизелей используются дорогостоящие системы снижения токсичности отработавших газов). Степень сжатия двигателя, использующего технологию HCCI, такая же, как у обычных бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива, а в качестве топлива могут быть использованы уже имеющиеся в продаже сорта бензина. С точки зрения разработчиков системы, наиболее трудной задачей, решаемой при создании технологии HCCI, является управление процессом сгорания. Если при использовании искрового зажигания для этого могут использоваться угол опережения зажигания и интенсивность искрового разряда, то при использовании технологии HCCI, где при сгорании отсутствует факел пламени, чтобы добиться требуемых характеристик двигателя приходится осуществлять сложное синхронное регулирование состава смеси и температуры.

Приведенные концепции развития смецеобразования в ДВС показывают, что грань между реализацией рабочих процессов в бензиновых и дизельных двигателях стирается и работы фирм по созданию новейших ДВС направлены на создание двигателей, которые объединяли бы преимущества циклов Отто и Дизеля.

Для обеспечения оптимальных мощностных параметров двигателя, высокой экономичности и снижения токсичности отработавших газов ведущими автопроизводителями мира также применяется регулировка фаз газораспределения. В настоящее время она реализуется двумя способами: сдвигом фаз и масштабированием (в виде изменения подъема клапана).

Конструктивно сдвиг фаз реализуется проще, но он менее эффективен в плане увеличения мощности и может быть реализован только в схемах с двумя распределительными валами, т. к. уменьшение или увеличение

перекрытия клапанов при изменении оборотов двигателя выполняется обычно поворотом вала, управляющего впускными клапанами. Однако рост мощности от увеличения перекрытия клапанов на высоких оборотах двигателя при этом ограничивается снижением дозарядки топливо-воздушной смесью в результате уменьшения угла закрытия клапана после прохода НМТ. Регулировка фаз газораспределения за счет масштабирования диаграммы подъема кулачка может быть осуществлена в виде попеременно работающих кулачков с различной разверткой: на малых и высоких оборотах. При этом в первом случае фазы сужаются, а во втором – расширяются. Такая схема реализована еще в 80-х годах прошлого века на одном из двигателей фирмы «Хонда» (VTEC-2 DOHC) за счет размещения на распределительном вале двух комплектов кулачков (широкого с большим подъемом для высоких оборотов и узкого с малым подъемом), с которыми работали два комплекта рокеров, один из которых соединяется с другим гидравликой при помощи подпружиненного штифта. В 1991 году появилась система VVT фирмы Toyota. В этой системе профиль кулачков не меняется, но на каждом из двух распределительных валов (отвечающих за впуск и выпуск) стоят гидравлические фазовращатели, изменяющие моменты впуска и выпуска относительно ВМТ поршневой группы. Дальнейшим развитием этой системы является система

«VVT*i*» (*i* - использование чисто электронного управления), в которой появился механизм, изменяющий высоту подъема впускных клапанов.

Одной из самых совершенных конструкций изменения фаз газораспределения является система Double VANOS фирмы БМВ. В ней оба распределительных вала, управляющих соответственно впускными и выпускными клапанами, могут поворачиваться относительно начального положения, изменяя моменты начала впуска и выпуска (длина фаз, определяемая профилем вала, постоянна), а также продолжительность перекрытия клапанов (фаза, когда впускной и выпускной клапаны открыты одновременно). Однако эта система обеспечивает оптимальные условия работы мотора только при полностью открытой дроссельной заслонке. При работе двигателя на режимах частичной нагрузки дроссельная заслонка создает во впускном трубопроводе разрежение, которое ухудшает наполнение цилиндров. Целесообразно было бы открывать впускной клапан только на время, необходимое для наполнения цилиндра горючей смесью. В двигателях БМВ, как и у Тойоты появилась механическая система управления не только фазами, но и подъемом впускных клапанов. К Double VANOS добавился механизм, изменяющий высоту подъема впускных клапанов (система VALVETRONIC, рис. 5). Реализовано это было следующим образом: между рас-



Рис. 5. Реализация системы VALVETRONIC

пределительным валом и каждой парой впускных клапанов поместили дополнительный рычаг, в зависимости от положения оси вращения которого изменяется закон движения клапанов. Положение его оси, в свою очередь, задается вращением дополнительного эксцентрикового вала от электромотора. В результате и высота подъема клапанов, и, соответственно, продолжительность фазы впуска изменяются в зависимости от положения педали газа, что позволило избавиться от дроссельной заслонки и за счет этого на 10-18 % снизить расход топлива по сравнению с мотором, оснащенный только Double VANOS. С увеличением числа оборотов величина открытия клапанов увеличивается. При этом уменьшается сопротивление газовым потокам внутри цилиндра, скорость продувки и наполнения цилиндра топливовоздушной смесью возрастает. Кроме того, увеличивается действие так называемого инерционного эффекта. Топливовоздушная смесь внутри цилиндра запирается клапанами при гораздо большем давлении, ее плотность выше, чем при минимальных оборотах. При минимальных оборотах ход клапана мал, поэтому уменьшается эффект перекрытия клапанов, что и позволяет снизить расход топлива.

Совершенствование систем газораспределения не ограничивается только изменени-

ем фаз. Так, фирма («Ауди») решает эту задачу за счет увеличения количества клапанов до пяти клапанов на цилиндр (рис. 6). Работы над пятиклапанной системой проводились «Ауди» с 1984 года, но их результаты вначале использовались только на спортивных автомобилях. На серийных двигателях фирмы эта схема нашла применение с 1994 года. Такое решение позволяет увеличить эффективное проходное сечение клапанной системы, оптимизировать наполнение цилиндра, обеспечить лучшее распределение заряда по камере сгорания и в результате улучшить экономичность и экологические характеристики. Кроме того, в пятиклапанной головке цилиндра увеличение расстояния между клапанами и свечой зажигания позволяет, исходя из возможностей технологий, применяемых для отливки головки блока цилиндров, обеспечить лучшее отделение свечного колодца от выпускных каналов и увеличить, таким образом, эффективность охлаждения соответствующего участка головки. В результате особенностью данной конструкции ДВС с пятью клапанами на цилиндр является сравнительно малая, несмотря на высокую степень наполнения цилиндров, склонность этих ДВС к возникновению в них детонации. В пятиклапанной системе «Ауди» используется три канала впускных клапанов, которые, сходясь, образуют овальное отверстие, к ко-

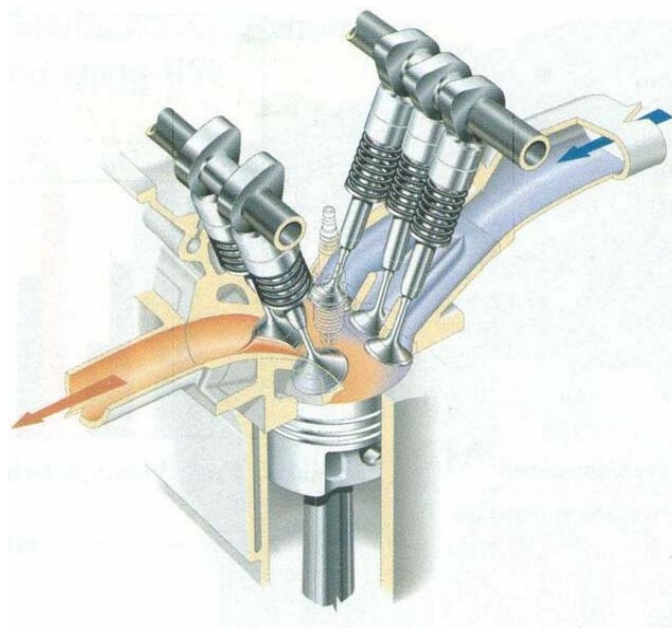


Рис. 6. Пятиклапанная система «Ауди»

торому присоединяется фланец впускного трубопровода. Благодаря своей конструкции каналы создают завихрения впускаемого воздуха, достаточные для обеспечения достаточно малой склонности ДВС к возникновению в нем детонации, в том числе и при использовании систем управления составом смеси (адаптации состава смеси) по коэффициенту избытка воздуха, в которых значение этого коэффициента (лямбды) предполагается поддерживать по возможности близким к единице. Кроме того, конструкция каналов допускает применение двухструйных клапанных форсунок, ориентирующих струи впрыскиваемого топлива в направлении всех трех впускных клапанов. При этом практически все топливо распыляется в направлении тарелок клапанов, и лишь самый минимум топлива попадает на стенки цилиндра, точнее, не на сами стенки, а на перемычки между каналами. Конструкция выпускных каналов аналогична конструкции выпускных каналов двигателя с четырьмя клапанами на цилиндр.

Многоклапанные двигатели отличаются тем, что уже при небольшой высоте подъема клапанов их клапанными системами обеспечиваются большие проходные сечения, вследствие чего эти двигатели весьма чувствительны к точности соблюдения параметров впускных и выпускных каналов, а также к точности настройки фаз газораспределения. Только при соблюдении названных условий в таких двигателях может быть обеспечен требуемый коэффициент наполнения цилиндров и эффективная очистка цилиндров от остаточных газов. Интересно, что на некоторых двигателях фирмы «Опель» пошли также на изменение числа клапанов, но в другую сторону. В их системе «VarioCam» на режиме малых нагрузок перекрывается один из впускных клапанов. При этом скорость во втором возрастает, поток начинает закручиваться по спирали и обедненная смесь лучше перемешивается и полнее сгорает.

Для повышения мощности ДВС достаточно длительное время используется наддув. В двигателях TSI фирмы «Фольксваген» наддув выполнен двухступенчатым: вначале давление повышается компрессором, а затем за счет турбонаддува. Это сделано для того, что-

бы во время интенсивного разгона, когда турбина еще не развила необходимую скорость, давление воздуха на впуске поднимает механический компрессор, а после выхода турбины на рабочий режим она берет функции обеспечения повышения давления на впуске на себя. На высоких нагрузках и компрессор, и турбонаддув действуют параллельно. При отсутствии необходимости в высоком крутящем моменте электроника переводит работу двигателя на атмосферный режим. Для этого привод механического компрессора осуществляется через магнитную электронную муфту, которая позволяет быстро подключать или отключать компрессор. Все в совокупности позволяет в широком диапазоне оборотов иметь большой крутящий момент. Чтобы получить плавную характеристику крутящего момента также используются впускные коллекторы переменной длины. Так, на самом мощном в мире атмосферном двигателе фирмы AMG M156 E63 (510 л.с. и 630 Нм) длина впускного канала за 0,1 с способна изменяться вдвое. Длинный впускной канал используется для разгона воздушного потока для получения динамического наддува на низких оборотах и невысоких скоростях, когда встречный воздушный поток невелик, а на средних и высоких оборотах длина канала уменьшается, так как необходимость в искусственном ускорении воздушного потока отпадает, дополнительно уменьшаются аэродинамические потери на трение.

Наибольшие возможности по улучшению наполнения цилиндров без увеличения числа и размера клапанов, изменения их подъема и фазы впуска дает электромагнитный привод клапанов. При тех же времени открытия и высоте подъема определяющий параметр «время-сечение» будет больше, так как электромагнитный клапан открывается и закрывается значительно быстрее. За счет этого можно увеличить крутящий момент двигателя примерно на 7 %.

На опытном образце четырехцилиндрового мотора БМВ с электромагнитными клапанами и непосредственным впрыском бензина привод клапанов устроен следующим образом: подпружиненный клапан помещен между двумя электромагнитами, которые

удерживают его в крайних положениях: закрытом и открытом. О текущем положении клапана микропроцессору выдает информацию специальный датчик. Это необходимо, чтобы снизить до минимальной его скорость в момент касания седла. Количество воздуха, поступающего в цилиндр, определяется временем открытия клапана - высота подъема не регулируется. Изменение программы управления клапанами позволяет отключать отдельные клапаны, а, следовательно, и цилиндры. Это дает возможности по обеспечению эффективного «торможения двигателем», повышению экономичности и т. д.

Вышесказанное свидетельствует о том, что большинство работ конструкторов в области ДВС направлено на оптимизацию рабочего процесса ДВС с целью достижения максимальной экономичности и лучших эко-

логических характеристик при достаточных мощности и крутящем моменте. Для достижения этих целей используются:

- непосредственный впрыск в дизелях в совокупности с электронным управлением;
- оптимизация впускных трубопроводов, сечений клапанов и их количества;
- разработка различных систем регулирования фаз газораспределения бензиновых моторов;
- широкое применение наддува как в дизелях, так и для бензиновых двигателей;
- внедрение электронных систем управления форсунками и клапанами.

Список литературы

Рекламные проспекты автомобильных фирм «Ауди», «БМВ», «Даймлер-Бенц», «Мицубиси», «Опель», «Хонда», «Фольксваген».

THE WAYS OF OPERATING PROCESS' IMPROVEMENT IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

© 2007 E. V. Belyaeva, M. Y. Orlov, D. A. Uglanov

Samara State Aerospace University

In this paper it is shown the main ways of operating process' improvement in internal combustion engines used by foreign companies that produce engines. It is dedicated main work directions and described serial engine designs with their advantages.