

04, апрель 2016

УДК 621.436

Возможности применения различных сортов топлив в транспортном дизеле с регулируемой степенью сжатия

Гуртовой А.В., магистрант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Поршневые двигатели»*

*Научный руководитель: Чайнов Н.Д., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Поршневые двигатели»*

bauman@bmstu.ru

Многотопливный двигатель, двигатель внутреннего сгорания, предназначенный для работы на различных нефтяных топливах, начиная от бензина и заканчивая дизельным топливом. Первые многотопливные двигатели появились в 30-х годах 20 века Германии. Они строились на базе карбюраторных двигателей, но имели отдельную подачу воздуха и топлива. Воздух поступал в цилиндры под действием разрежения, а топливо впрыскивалось насосом с давлением около 5 Мн/м² (50 кгс/см²). Пуск двигателя осуществлялся на бензине при помощи карбюратора, выключавшегося при нормальной работе. Смесь воспламенялась электрической системой зажигания.

В 40-е годы получили развитие многотопливный двигатель, построенные на базе автомобильных дизельных двигателей. Топливо в них подавалось насосом под давлением около 21 Мн/м² (210 кгс/см²). При переходе с одного топлива на другое при помощи насоса подачи топлива устанавливался одинаковый расход топлива по массе, тем самым сохранялась та же мощность двигателя. [8]

Применение многотопливных двигателей на автомобилях и тракторах значительно расширяет их топливную базу. По сравнению с карбюраторными двигателями многотопливные двигатели обладают лучшей топливной экономичностью, но уступают дизелям. К недостаткам многотопливных двигателей относятся сложность конструкции и необходимость тщательного наблюдения за работой системы топливоподачи. Многотопливные двигатели получили широкое распространение за рубежом.

Проблема обеспечения многотопливности. Двигатели разных типов работают на вполне определённых сортах топлива. Для дизелей используются дизельные топлива, для двигателей с внешним смесеобразованием – бензины.

Способность двигателей работать на вполне определённых сортах топлива является, в определённом смысле, их недостатком. Поэтому вызывают интерес работы по созданию таких двигателей, которые были бы способны работать на различных сортах топлив. Решение этой проблемы упростило бы снабжение топливом различных отраслей промышленности и хозяйства, облегчило бы решение вопросов транспортировки топлив. Двигатели, способные работать на различных сортах топлив, получили название многотопливных, или «всеядных». Такие двигатели создаются обычно на базе дизелей, поскольку дизельный рабочий цикл является наиболее экономичным [1,2,3].

Основными проблемами, которые возникают при решении вопросов многотопливности ДВС, являются проблемы обеспечения надёжного пуска, устойчивой работы на холостом ходу и малых нагрузках, а также умеренности давлений рабочего тела при работе двигателя на полных нагрузках [1,4,5].

Бензины трудно самовоспламеняются, поэтому для того, чтобы обеспечивалась работа двигателя на бензине, многотопливный ДВС должен иметь высокую степень сжатия. Однако при высокой степени сжатия возрастает механическая напряжённость деталей: растёт максимальное давление цикла. Поэтому высокую ϵ желательно иметь только при пуске и работе двигателя на малых нагрузках, а при его работе на полных нагрузках степень сжатия ϵ должна быть уменьшена. С этой целью многотопливные двигатели внутреннего сгорания снабжаются камерами сгорания переменного объёма (при пуске объём камеры сгорания степень сжатия уменьшают, а при нагрузках увеличивают). Таким образом, целесообразно регулирование степени сжатия.

При работе на лёгких топливах в многотопливных двигателях целесообразен подогрев воздуха на впуске. Он осуществляется, например, использованием теплообменников системы охлаждения, а также теплоты отработавших газов (обогрев впускного трубопровода или добавление газов к свежему заряду). Подогрев впускного заряда осуществляется только при работе на малых нагрузках и холостом ходу. Для снижения максимальных давлений рабочего тела используется двойной впрыск топлива: вначале в цилиндр двигателя подается небольшое количество топлива, а затем в горящую смесь впрыскивается оставшая доза.

Топливоподающие системы многотопливных двигателей имеют характерные особенности. Применение бензинов, других легких топлив, может стать причиной

образования паровых пробок в топливопроводах (испаряемость бензинов в 2,5-3 раза выше испаряемости дизельных топлив). Паровые пробки нарушают процесс топливоподачи. Предотвратить образование паровых пробок можно, применив охлаждение топливной аппаратуры или повысив давление в системе подвода к насосу (обычно давление повышают до 0,3 до 0,5 МПа) [3,4,5].

Применение различных топлив приводит к разнице в величине цикловых подач, соответствующих одному и тому же положению органа управляющего подачей топлива (это обуславливается различной удельной массой топлив). Поэтому в многотопливных двигателях должны быть предусмотрены специальные устройства, позволяющие увеличивать объемную цикловую подачу при переходе на легкие сорта топлив. Причинами уменьшения мощности двигателей при работе на легких топливах могут быть утечки топлива. Например, утечки бензина через зазоры в плунжерных парах топливного насоса высокого давления примерно в 10 раз превышают утечки дизельного топлива [4,5].

Для обеспечения многотопливности важно комплексное использование названных мер применительно к условиям пуска, работы вхолостую, на малых и полных нагрузках [3,4,5,7].

Требования предъявляемые к многотопливным двигателям.

Для нормального сжигания в дизелях топлива, значительно отличающегося по вязкости и температуре самовоспламенения от дизельного (например, бензина, цетановое число которого лежит в пределах от 12 до 18 пунктов против 40-48 у обычного дизельного топлива) необходимо обеспечить:

1. Более высокую температуру в цилиндре в конце такта сжатия, что достигается повышением степени сжатия и уменьшением отвода тепла от головки цилиндра;
2. Повышенную температуру всасываемого в цилиндр воздуха и хорошее перемешивание его с топливом;
3. Установку топливной аппаратуры, приспособленной для работы на таких топливах.

Кроме того, многотопливные двигатели должны легко заводиться при температуре окружающей среды от -50 °С до +50 °С и одновременно иметь хорошую топливную экономичность при эксплуатации.

Наиболее подходящим для этой цели является специальный конвертированный двигатель – дизель, удовлетворяющий перечисленным требованиям. Конвертирование

двигателя заключается в введении в него таких конструктивных изменений, которые должны обеспечить удовлетворительную работу на различных сортах топлива при неизменном законе подачи топлива и неизменном начальном давлении впрыска.

Внесенные изменения в конструкцию базовых дизелей были обусловлены свойствами топлива, и поэтому у всех фирм они свелись в основном, во-первых, к способам устранения парообразования в системе топливоподачи двигателя и во вторых, к обеспечению надежного самовоспламенения топлива с низким цетановым числом в самых неблагоприятных температурных условиях.[4]

Меры обеспечения самовоспламенения топлива.

Вследствие высокой температуры самовоспламенения (550 – 600 °С) бензин будет воспламенятся в дизеле с нормальной температурой в конце сжатия, но не будет воспламенятся при пуске холодного двигателя. Поэтому моторостроительные фирмы оказались вынужденными при помощи специальных мер довести температуру воздуха в конце сжатия до 600°С даже при низких температурах наружного воздуха. В значительной мере это достигается повышением степени сжатия от 16 до 22 и выше. Однако повышение степени сжатия приводит к повышению максимального давления сгорания и, соответственно, к увеличению нагрузки на коренные и шатунные подшипники коленчатого вала, поршневые кольца, на уплотнение головки блока цилиндров и клапаны. Как показал опыт эти трудности вполне преодолимы. [2,3]

Условия обеспечения работы дизеля на легких топливах связаны с особенностями их физико-химических свойств, к которым относятся более высокие температура самовоспламенения и испаряемость, меньшие плотность и вязкость, низкие смазывающие свойства. При более высокой температуре самовоспламенения увеличивается период задержки воспламенения, вследствие чего возрастает жесткость работы двигателя, т. е. скорость нарастания давления по углу поворота коленчатого вала, и повышается максимальное давление цикла.

Для уменьшения периода задержки воспламенения повышают температуру воздуха в цилиндре к моменту впрыскивания топлива за счет увеличения степени сжатия ϵ на 2-3 единицы, применения на днище поршня стальной жаровой накладки и выполнения камеры сгорания в поршне, устанавливают топливную аппаратуру с двойным впрыскиванием топлива в цилиндры. При двойном впрыскивании раннее сгорание предварительно впрыснутой небольшой порции топлива обеспечивает повышение

температуры в цилиндре и способствует воспламенению последующей основной порции топлива.

Благоприятное влияние на процесс сгорания легких топлив оказывают наддув двигателей, пленочное смесеобразование, применение разделенных камер сгорания (с форкамерой или вихрекамерой).

Для организации процесса пленочного смесеобразования камеру сгорания выполняют в поршне. Основная масса топлива впрыскивается в камеру под острым углом к стенке, в результате чего на ней образуется топливная пленка. Нагреваясь от стенки камеры, пленка испаряется, и образуется равномерная топливовоздушная смесь.

Небольшая часть топлива (примерно 5 %) впрыскивается в объем камеры сгорания. Это топливо подготавливается к воспламенению как обычно и воспламеняется раньше остального топлива, поскольку температура воздуха в конце сжатия выше температуры стенок.

Образующийся очаг пламени является источником зажигания смеси, создаваемой при испарении пленки. Рабочий процесс при пленочном смесеобразовании протекает плавно, так как топливо вовлекается в реакцию горения по мере его испарения с поверхности пленки. При таком процессе мягкость работы двигателя обеспечивается не только на дизельном топливе, но и на топливе для реактивных двигателей и бензине.

Вследствие более высокой температуры самовоспламенения ухудшаются пусковые качества двигателя при работе на бензине, особенно при эксплуатации в зимних условиях. [2,3]

Влияние увеличения степени сжатия в многотопливных двигателях.

Увеличение степени сжатия повышает начало впрыска давление и температуру к концу сжатия. Это приводит к увеличению концентрации кислорода и улучшению теплообмена между впрыснутым топливом и воздухом. Таким путем сокращается период подготовки топлива к воспламенению, что выгодно отражается на протекании рабочего процесса.

С увеличением степени сжатия значительно сокращается период запаздывания самовоспламенения, снижается скорость нарастания давления, работа двигателя становится более плавной. Максимальное давление сгорания возрастает; удельный индикаторный расход топлива уменьшается, поскольку повышается среднее индикаторное давление, вызывающее увеличение индикаторного коэффициента полезного действия. Пусковые качества двигателя улучшаются. Влияния свойств топлив, в смысле

продолжительности задержки самовоспламенения, с увеличением степени сжатия значительно сглаживаются.

При выборе степени сжатия, стремясь получить высокое среднее эффективное давление и хорошую экономичность, приходится считаться с величиной максимального давления сгорания и чувствительностью двигателя к опережению впрыска. Особенно чувствительны к углу опережения впрыска двигатели с повышенной степенью сжатия, работающие с неразделенной камерой сгорания; двигатели с вихревыми камерами в этом отношении менее чувствительны. В двигателе с небольшой степенью сжатия путем увеличения угла опережения впрыска можно получить высокое среднее эффективное давление, но при этом наблюдается увеличение периода задержки самовоспламенения, что создает жесткую работу двигателя со стуками и вибрацией. Учитывая современные тенденции развития двигателестроения (экологичность и экономичность) целесообразно применить в качестве второго вида топлива газ (метан). [9,10]

Существует два основных аспекта целесообразности перевода дизельного двигателя на газовое топливо (рис.1).

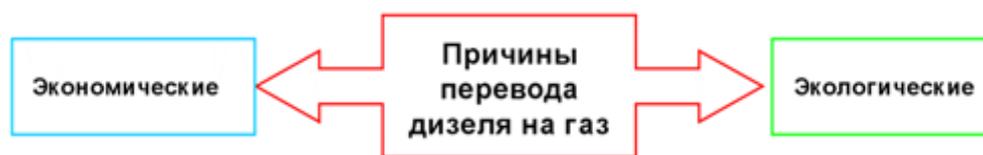


Рис. 1. Причины перевода двигателя на газ

Первый аспект – это экономический. Из-за разности стоимости дизельного и газового топлив переводить дизельный двигатель на газ выгодно. Например, на конец января 2008 года стоимость 1 литра дизтоплива в Московском регионе составляла 19,5-20,5 руб., стоимость 1 литра пропан-бутана составляла 9,5-10,5 руб., стоимость 1 м³ метана составляла 8,5 руб.

Вторым аспектом является уменьшение токсичности выхлопных газов при переводе дизеля на газовое топливо. Особенно уменьшается дымность выхлопа и содержание твердых частиц (сажи).

На рисунке 2 представлены основные способы перевода дизеля на газовое топливо.



Рис. 2. Способы перевода дизельных двигателей на газовое топливо.

На практике используются два принципиально различающихся способа перевода дизельных двигателей на питание газовым топливом:

(1) Конвертация дизельного двигателя в двигатель внутреннего сгорания с воспламенением газозвушной смеси от искры (полное замещение топлива).

Данный способ достаточно радикальный и связан со значительным изменением конструкции базового двигателя. При этом с двигателя демонтируют дизельную топливную аппаратуру, уменьшают степень сжатия до 11-14 единиц, устанавливают систему зажигания, топливоподающую газовую систему и газовые баллоны. В результате двигатель работает на газовом топливе, которое имеет стоимость ниже, чем дизельное топливо. Экологические параметры отработавших газов конвертированного дизеля, как правило, выше исходного двигателя, мощностные параметры находятся на одном уровне с базовым двигателем. После выполнения конвертации двигатель уже не может больше работать на дизельном топливе, обратная операция практически невозможна.

(2) Использование газодизельного режима. В газодизельном режиме в двигатель подают два топлива – основное дизельное (но в меньшем количестве, чем в базовом), дополнительное - газовое (топливо для замещения). При этом основное дизельное топливо играет роль «запальной» дозы для воспламенения интегральной газозвушной топливной смеси. Степень замещения дополнительным топливом зависит от нескольких факторов, в основном от типа газового топлива (метан или пропан), совершенства устанавливаемой дополнительной газотопливной аппаратуры и базовой дизельной аппаратуры. Очень важным моментом при использовании газодизельного режима

является тот факт, что возможен переход на исходный дизельный режим в любой момент времени, как правило, переключатель режима находится в кабине водителя.

В газодизельном режиме обычно используют пропан (2.1) или метан (2.2) для замещения. У каждого вида из этих газовых топлив есть свои достоинства и недостатки.

(2.1) Использование пропана, точнее смеси пропана и бутана (СНГ или СУГ) позволяет получить следующие преимущества: распространенность и доступность газовых заправок; большой пробег на одной заправке, т.к. газовое топливо хранится на борту автомобиля в сжиженном виде; газовый баллон (баллоны) не требуют много места на борту, серийно выпускаются и имеют низкую стоимость (от 1 до 2 USD за 1 литр объема); относительно низкая стоимость комплекта газобаллонного оборудования и невысокие первоначальные затраты на переоборудование автомобиля, быстрая окупаемость первоначальных затрат; универсальность комплекта для дооборудования, в большинстве случаев не требуется переделка ТНВД.

К недостатку от использования СНГ для газодизельного режима можно отнести: 1. Финансовая эффективность от экономии (после окончания периода окупаемости первоначальных затрат) находится на невысоком уровне и составляет от 11 % до 16 % в расчете от предыдущих затрат на дизельное топливо.

(2.2) Использование метана для замещения может быть реализовано двумя способами, отличающимися видом хранения газа на борту автотранспортного средства.

(2.2.1) В первом случае метан (КПГ) хранится в сжатом виде в специальных баллонах высокого давления (давление до 200 кг/см²), при этом возможно получить следующее преимущество: самая высокая финансовая эффективность от экономии (после окончания периода окупаемости первоначальных затрат), составляющая от 35 до 55 % в расчете от предыдущих затрат на дизельное топливо.

К недостаткам от использования КПГ для газодизельного режима можно отнести:

- Не распространенность сети заправок, привязанность маршрута движения автомобиля к определенной заправке (АГНКС).
- Временные затраты на заправку баллонов КПГ выше, чем в случае (2.1).
- Относительно небольшой пробег на одной заправке, так как газ хранится в баллонах в сжатом виде, поэтому масса заправленного топлива невелика.
- Газовый баллон (баллоны) требуют много места на борту, а их суммарная масса уменьшает грузоподъемность автомобиля.
- Газовый баллон (баллоны) выпускаются ограниченными партиями (под заказ), имеют высокую стоимость (от 7 до 10 USD за 1 литр объема).

- Отсутствует универсальность комплекта для дооборудования, требуется переделка ГНВД.
- Относительно высокая стоимость комплекта оборудования и высокие первоначальные затраты, увеличивающие период окупаемости.
- (2.2.2) Во втором случае метан (СПГ) хранится в сжиженном виде в специальном криогенном баллоне (давление до 1-6 кг/см², температура около минус 155 °С), при этом возможно получить следующие преимущества:
 - Относительно высокая финансовая эффективность от экономии (после окончания периода окупаемости первоначальных затрат), составляющая от 20 до 30 % в расчете от предыдущих затрат на дизельное топливо.
 - Большой пробег на одной заправке, т.к. газовое топливо хранится на борту автомобиля в сжиженном виде.
 - Газовый баллон (баллоны) не требуют много места на борту.
 - Стоимость комплекта газобаллонного оборудования ниже стоимости в варианте (2.2.1), что уменьшает первоначальные затраты на переоборудование автомобиля.
 - К недостаткам от использования СПГ для газодизельного режима можно отнести:
 - Практически полное отсутствие сети заправок, привязанность маршрута движения автомобиля к определенной заправке (В Московском регионе одна заправка).
 - Газовые криогенные баллоны выпускаются в виде опытных образцов (под заказ), имеют самую высокую стоимость (от 10 до 20 USD за 1 литр объема).
 - Отсутствует универсальность комплекта для дооборудования, требуется переделка ГНВД.
 - При длительной стоянке автомобиля без расхода топлива возможен запланированный периодический сброс газообразной фазы из криобаллона для предотвращения резкого повышения давления. Данный фактор накладывает ограничения на парковку автомобиля и требует особых мер по отслеживанию остатков топлива в криобаллоне.

Таким образом, исходя из вышеизложенного для двигателя с изменяемой степенью сжатия выбирается газодизельный режим работы.

В двухтопливном газодизельном режиме (рис. 3) в двигатель подают два топлива – основное дизельное (но в существенно меньшем количестве) и дополнительное –

замещающее газовое. При этом основное дизельное топливо играет роль «запальной» дозы для воспламенения интегральной газозвушной топливной смеси.[9,10, 11,12]



Рис. 3. Схема работы двухтопливного газодизельного двигателя

Запальное топливо необходимо для поджигания газозвушной смеси. Метан имеет существенно более высокую температуру самовозгорания, чем дизельное топливо и поэтому сам он воспламенится в обычном дизельном цикле не может. Именно поэтому, для реализации газодизельного режима в конце такта сжатия в цилиндры подается некоторое количество дизельного топлива, которая и поджигает газо-воздушную смесь, поступившую на такте впуска. Газодизельный двигатель может работать только на дизельном топливе, **но** не может работать только на газу.[11,12]

Экономия при переходе на газодизель.

Степень замещения дизельного топлива газовым является важнейшим показателем работы двигателя в газодизельном режиме, от которого и зависит экономия финансовых средств. Величина степени замещения может колебаться в достаточно широких пределах от 40 % до 85 % для метана и от 15 % до 50 % для сжиженного углеводородного газа (СУГ, он же пропан-бутан, он же СПБТ). Конкретные значения зависят от вида топливной аппаратуры исходного двигателя, совершенства используемой газодизельной системы и даже от манеры езды (см. рис. 4).

Зависимость степени замещения дизельного топлива газовым в зависимости от нагрузки

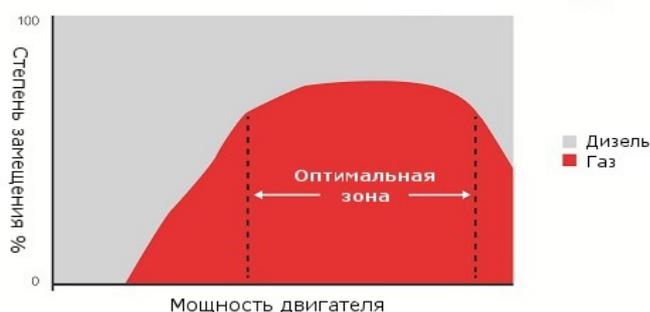


Рис. 4. Зависимость изменения степени замещения дизельного топлива газовым в зависимости от нагрузки

Дело в том, что запуск двигателя и его работа в режиме малых нагрузок (до 20 % от максимальной) осуществляется практически на чистом дизельном топливе, так как в таком режиме очень трудно подобрать устойчивые параметры подачи газа. Далее с ростом нагрузки (примерно до 70 % - 80 %) идет участок наиболее благоприятный для газодизельного режима, степень замещения газом дизельного топлива на этом участке максимальна и может достигать 85 %.[12]

Однако в целях сохранения проектного теплового режима двигателя приходится отставлять некоторое потребление ДТ для охлаждения топливных форсунок. Когда двигатель выходит на полную мощность и обороты максимальные, то время рабочего цикла уменьшается и газ просто не успевает сгорать и системе управления газодизелем приходится уменьшать его подачу.

Для практических расчетов можно использовать гарантированную степень замещения в 50 - 60 % для двигателей для метана и 20 - 50 % для пропана. Большие степени замещения возможны, особенно при правильном стиле вождения, но не гарантированы. Для двигателей с топливной системой Common Rail и новым контролером CR-1 возможен несколько лучший результат (примерно + 5 %).

КПД газодизельного двигателя выше, чем КПД исходного двигателя примерно на 3-5%. Это объясняется внешним смесеобразованием газодизельного двигателя, что дает возможность получения гомогенной смеси во всасывающем тракте.

Из-за более высокого КПД, потребление метана составляет примерно 1,1-1,4 нм^3 на 1 л замещенного дизельного топлива (у 100 % газового двигателя 1,3 — 1,8 $\text{нм}^3 = 1$ л. ДТ). [12]

Технология перевода дизельного двигателя в газодизельный режим. Перевод дизельного двигателя в газодизельный режим не потребует серьезного вмешательства в сам двигатель и осуществляется с выездом специалистов на предприятие.

Сердцем газодизельной системы является управляющий компьютер ECU (Electronic Control Unit) к нему поступают сигналы от различных датчиков, на основании которых ECU формирует управляющие воздействия на подачу газа и дизельного топлива.

Конкретный набор сигналов различается в зависимости от вида топливной аппаратуры двигателя и вариантов реализации системы, например набор сигналов от датчиков представлен в таблице.

Обороты коленвала	Детонация
Электронная педаль газа	Обороты двигателя
Температура двигателя	Давление газа
Давление подачи ДТ	Давление наддува

В случае конверсии современных двигателей с топливной аппаратурой COMMON RAIL между ECU двигателя и ECU газодизельной системы обмен данными осуществляется с помощью CAN магистрالی (рис. 5).



Рис. 5. Обобщенная установки газового оборудования для работы двигателя в газодизельном режиме

В входной тракт забора воздуха врезаются инжекторы, которые впрыскивают газ по сигналам поступающим от управляющего компьютера ECU, а в топливную магистраль (если необходимо) встраивается актюатор (механический ограничитель подачи дизельного топлива), который тоже управляется ECU. В зависимости от типа топливной системы актюатор может быть заменен на специальный ограничитель хода педали газа или давления топлива в системе COMMON RAIL.

Изменение характеристик двигателя при работе на газодизеле

Основные характеристики двигателя (мощность, максимальный момент, кривая зависимости момента от оборотов двигателя, шумность, температура выхлопных газов) в газодизельном режиме существенно зависят от процента замещения дизельного топлива газовым и могут быть как выше так и ниже значений достигаемых при работе только на дизельном топливе.

При рекомендуемых нами средних значениях замещения дизельного топлива газовым (50 - 60 % для дизелей с насос-форсунками или механическим ТНВД и 55 - 65 % для дизелей с COMMON RAIL) основные характеристики двигателя не изменятся.

Экологическая составляющая газодизельного двигателя

Двигатель работающий в газодизельном режиме обладает более совершенными экологическими характеристиками чем двигатель, работающий на дизельном топливе. Однако, степень уменьшения эмиссии экологических вредных веществ сильно зависит от режима работы двигателя и степени замещения дизельного топлива газовым. [12]

По данным Европейской ассоциации газомоторных транспортных средств, при уровне замещения 50 % дизельного топлива газовым (метаном) достигается следующее уменьшение эмиссии вредных веществ (рис. 6):

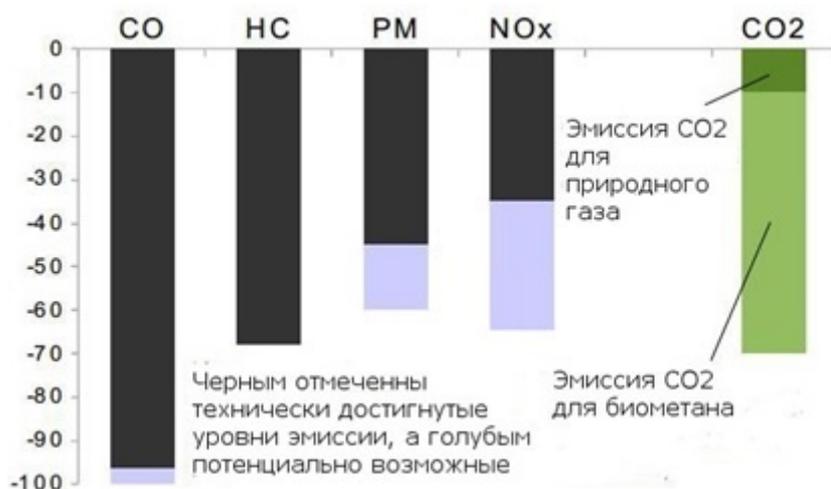
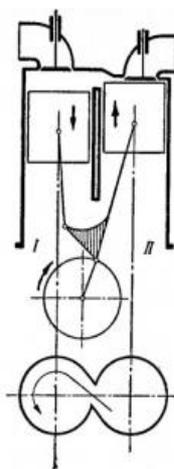


Рис. 6. Показатели снижения эмиссии вредных веществ

Двигатель Кушуля (рис. 7), как пример многотопливного двигателя

Камеру сгорания имеет только один цилиндр, обозначенный на схеме цифрой I. В него и подается, как в обычном карбюраторном двигателе, горючая смесь (на режимах больших нагрузок эта смесь должна быть обогащенной). Другой цилиндр II заполняется, как в дизеле, чистым воздухом. Поршень этого цилиндра в верхней мертвой точке (ВМТ) подходит к крышке цилиндра с минимально возможным зазором, поэтому весь его воздушный заряд через короткий и широкий соединительный канал вытесняется в камеру сгорания цилиндра I.



Принципиальная схема нового двигателя.

Рис. 7. Принципиальная схема двигателя Кушуля

Подача заряда горючей смеси в цилиндр I и воздуха в цилиндр II происходит одновременно (естественно, по отдельным впускным трактам). Смесь в цилиндре I сжимается до степени сжатия 6,5 — 7, как в обычном карбюраторном двигателе, и

воспламеняется от запальной свечи системы зажигания за 10° — 12° поворота вала до прихода поршня в ВМТ. Поршень цилиндра II в этот момент будет находиться от ВМТ на расстоянии, соответствующем 34° – 36° поворота вала, и объем над ним будет примерно равен объему камеры сгорания цилиндра I.

Следовательно, на этой первой фазе, несмотря на то, что цилиндры сообщаются между собой, в них одновременно происходят различные процессы: в первом — сгорание, а во втором — сжатие (с возможным крайне незначительным перетеканием сжатого воздуха в цилиндр I).

Когда поршень цилиндра I приходит в ВМТ и сгорание в нем в основном заканчивается, воздушный заряд в цилиндре II, достигнув 20 – 22 - кратной степени сжатия (втрое большей, чем была в цилиндре I), начинает перетекать в цилиндр I, преодолевая давление образовавшихся в нем газов сгорания. В этих газах из-за недостатка кислорода содержится значительная доля несгоревшего топлива; теперь поступивший сюда кислород немедленно вступает в реакцию с продуктами неполного сгорания. Начинается вторая фаза процесса сгорания. Тангенциальное — по касательной к поверхности цилиндра – направление соединительного канала обеспечивает интенсивное завихрение газов потоком сжатого воздуха, что способствует полному сгоранию всего топлива (это подтверждается анализом выхлопных газов и отсутствием нагарообразования в камере и на днищах поршней).

Таким образом, сначала (фаза 1) происходит воспламенение и сгорание рабочей смеси при невысокой степени сжатия, умеренных температуре и давлении газов и недостатке кислорода, а затем (фаза 2) – сгорание продуктов газификации топлива с участием сильно сжатого воздушного заряда.

Во время второй фазы сгорания поршни движутся в противоположных направлениях. Сгорание с участием воздушного заряда из цилиндра II начинается в тот момент, когда поршень цилиндра I приходит в ВМТ, а заканчивается, когда в ВМТ приходит поршень цилиндра II (это положение и показано на схеме). Следовательно, суммарный объем над поршнями в начале и в конце второй фазы сгорания будет одинаковым, а это означает, что сгорание происходит при постоянном объеме; благодаря этому обеспечивается высокая степень расширения газов после сгорания, равная 10,5 — 11.

Оба цилиндра в одинаковой степени являются рабочими — каждый из них заполняется своим свежим зарядом, в каждом происходят процессы сжатия, а затем в

обоих (поскольку они соединены каналом) – расширения рабочего тела. В конце процесса расширения в них одновременно открываются выпускные клапаны.

Благодаря ступенчатому подводу тепла, малому изменению объема за вторую фазу сгорания и высокой степени последующего адиабатического расширения газа, температура и давление газов в начале процесса расширения будут значительно выше, чем в обычных двигателях, а в конце – значительно ниже. За счет такого увеличения температурного перепада и возрастает термический КПД: он на 20 – 25 % больше, чем у обычного двигателя.

На диаграмме (рис. 8) термодинамические циклы, осуществляемые в совместно работающих цилиндрах и представляющие единый рабочий процесс, для наглядности изображены отдельно. В первом цилиндре обогащенный заряд сжимается до точки 3, затем сгоранием топлива осуществляется подвод тепла (3 - 4). [13]

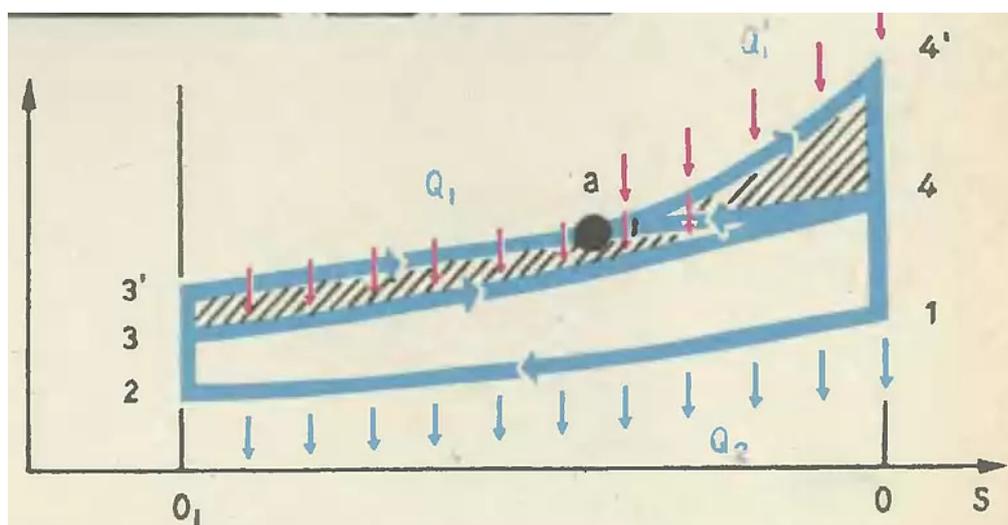


Рис. 8. Термодинамические циклы двигателя Кушуля

Во втором цилиндре свежий заряд воздуха сжимается до точки 3'. Далее происходит соединение рабочих тел обоих цилиндров (4-а и 3'-а) и сгорание продуктов газификации, полученных в первом цилиндре (а-4'), затем расширение (4'-1) и выхлоп (1-2). Прирост полезной работы и уменьшение тепловых потерь, по сравнению с термодинамическим циклом обычного ДВС, очевидны: выигрыш выражается площадью 3-3'-4'-4-3.

Остается добавить, что двигатель В. М. Кушуля эффективно работает и на неполных нагрузках благодаря возможности в широких пределах регулировать состав и количество подаваемого заряда. А благодаря более полному сгоранию топлива загрязнение атмосферы существенно меньше.

Необходимо упомянуть еще и о том, что без значительных переделок этот же двигатель можно превратить в дизель, работающий (с самовоспламенением заряда) на дешевом дизельном топливе. [13]

Список литературы

- [1]. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов. Челябинск: ЮУрГУ, 2004. 344 с.
- [2]. Хуциев А.И. Двигатели внутреннего сгорания с регулируемым процессом сжатия. М.: Машиностроение, 1986. 103с.
- [3]. Махалдиани В.В., Эджибия И.Ф., Леонидзе А.М., Двигатели внутреннего сгорания с автоматическим регулированием степени сжатия. Тбилиси: Мецниерба, 1973. 270 с.
- [4]. Селиванов И.И., Автомобили и транспортные гусеничные машины высокой проходимости. М.: Наука, 1967. 269с.
- [5]. Дино Имхоф, Дайсукэ Цуру, Хироши Тажияма, Кожи Такасаки// Двухтопливные двигатели (материалы конгресса СИМАС 2013). Новости двигателестроения IV – VI 2015. С. 39-48.
- [6]. Кавтрадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 238 с.
- [7]. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
- [8]. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Двигатели внутреннего сгорания: энциклопедия. В 40 т. Т. IV-14 / под общ. ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение 2013. 784 с.
- [9]. Марков В.А., Козлов С.И. Топлива и топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 296 с.
- [10]. Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Иващенко Н.А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. 464 с.
- [11]. Газодизель. Принцип работы газодизельного двигателя. Режим доступа: <http://www.ce-fund.ru/node/56> (дата обращения 09.11.2015).
- [12]. Теория дизель на газе. Режим доступа: <http://www.dieselgas.ru/theory/> (дата обращения 09.11.2015).

[13]. Двигатель внутреннего сгорания профессора Кушуля. Режим доступа: http://www.barque.ru/engine/1973/internal_combustion_engine_professor_kushulya (дата обращения 09.11.2015).