

Для оценки качества системы могут быть приняты следующие критерии:

- массогабаритный;
- эффективность охлаждения (продолжительность выхода на установившийся режим, минимальная температура нагрева двигателя и допустимый диапазон изменения температуры двигателя);
- экономический (расход топлива и ресурс системы).

Кроме того, должны учитываться неформализуемые показатели, к которым относятся технологические возможности производства приводов, опыт эксплуатации приводов данного типа и др.

Литература

1. Попов Д.Н. Оценка эффективности и оптимальное проектирование гидроприводов // Вестник машиностроения. 1986. №9
2. Попов Д.Н., Брусов В.А., Долгополов А.А. Разработка привода для управления продольными колебаниями транспортного средства на воздушной подушке // Журнал автомобильных инженеров (ААИ). 2010. №4.
3. Боровин Г.К., Попов Д.Н. Многокритериальная оптимизация гидросистем. –М.:МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2007.
4. Hydraulic fan drives. Gary Gotting. High Country Tek Nevada City, Calif.

Метод совершенствования показателей работы бензинового двигателя с внутренним смесеобразованием

д.т.н. проф. Фомин В.М., Платунов А.С.

МГТУ «МАМИ»

8(495)369-90-48, mixalichDM@mail.ru

Аннотация. Анализируются проблемные вопросы, связанные с перспективой разработки отечественных автомобильных бензиновых двигателей с внутренним смесеобразованием, которые стимулируют необходимость поиска средств и новых технических решений, приемлемых для отечественного двигателестроения. Отмечается неприемлемость прямого копирования зарубежных решений в отечественной практике, не только из-за высоких финансовых затрат для их реализации, но и с учетом отсутствия технологии и необходимых материалов для их производства. В качестве альтернативного варианта предложен метод, позволяющий при минимальных финансовых затратах оперативно решить актуальную проблему отечественного двигателестроения – создание российского автомобильного бензинового двигателя нового поколения с внутренним смесеобразованием. Метод основан на использовании водорода в качестве химического реагента, способствующего повышению эколого-экономических качеств двигателя.

Ключевые слова: двигатель с непосредственным впрыскиванием бензина, внутреннее смесеобразование, химический реагент, водородосодержащий продукт, оксиды азота, нейтрализация отработавших газов, метанол, реактор конверсии метанола.

Формулировка концепции метода

Высокий уровень топливно-экономических показателей бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием бензина (НВБ) обуславливает повсеместное стремление исследователей к их развитию и дальнейшему совершенствованию [1,2]. В настоящее время на международном рынке четко прослеживается постоянно растущий спрос на легковые автомобили с этими ДВС.

В целях ликвидации сложившегося отставания в данной области отечественного двигателестроения и повышения конкурентоспособности ряд российских научных центров и производителей приступил к разработке ДВС с НВБ. Однако, несмотря на очевидную приори-

тетность ДВС с НВБ, перспективы их производства и внедрения на отечественном автомобильном транспорте связаны с решением целого ряда серьезных проблем.

Работа двигателя с НВБ на режимах частичных нагрузок (характерных для условий городской езды, рисунок 1) с послойной организацией заряда ($\alpha \gg 1$) сопровождается выбросом в атмосферу оксидов азота вследствие потери восстановительной способности (нейтрализации NO_x) традиционного бифункционального нейтрализатора.

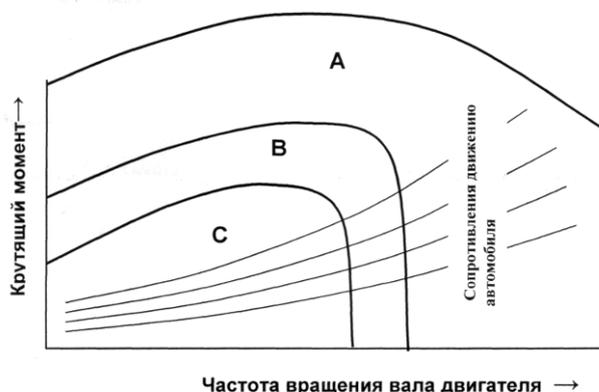


Рисунок 1 – Характерные эксплуатационные режимы работы автомобильного двигателя с непосредственным впрыскиванием бензина: А – область работы на режимах с организованным гомогенным смесеобразованием при $\alpha = 1$ (скоростная, загородная езда); В – область работы на режимах с организованным гомогенным смесеобразованием при $\alpha \geq 1$ с регулируемой рециркуляцией ОГ (область переходных режимов); С – область работы на режимах с организованным расслоением гетерогенной смеси при $\alpha \gg 1$ с рециркуляцией ОГ (городская езда)

Для снижения выбросов NO_x серийных зарубежных ДВС с НВБ до уровня нормативных требований ЕВРО-4 их изготовители вынуждены использовать дополнительную систему «вторичной» очистки накопительного типа, содержащую сорбционный аппарат (названный как нейтрализатор- NO_x) и сложную схему управления. Нейтрализатор- NO_x (с учетом его функционального назначения) требует часто повторяющейся (примерно через каждые 60...70 с) регенерации, то есть удаления накопленных в нем соединений NO_x и серы при рабочей температуре свыше 6500С. Проблема усугубляется низким качеством отечественного бензина, в частности, повышенным содержанием в нем серы, что проявляется в снижении эффективности нейтрализатора- NO_x , активной сульфатизации каталитического блока, в необходимости в более частом проведении процесса регенерации.

Проведение постоянно чередующегося высокотемпературного процесса регенерации нейтрализатора сорбционного типа обуславливает необходимость резкого повышения температуры выпускных газов за счет кратковременного перевода двигателя на энергетически убыточный режим работы (угол зажигания ~ 100 после ВМТ, $\alpha < 1$), что негативно отражается на ресурсных и топливно-экономических характеристиках двигателя, а также на процессе «старения» (потере эффективности) каталитического блока. В условиях городской езды суммарное время регенерации может составлять существенную часть времени езды.

Нерешенными проблемами для этих двигателей по-прежнему остаются снижение жесткости работы (шума) и эмиссии твердых частиц до уровня перспективных стандартов на режимах работы с организацией расслоения гетерогенной топливно-воздушной смеси (что свойственно дизельному процессу).

Устойчивая работа двигателя с НВБ на режимах с послойной организацией заряда возможна в ограниченной области (рисунок 1) изменения режимных параметров. Это связано с тем, что с повышением нагрузки и частоты вращения ДВС располагаемое время на осуществление процесса смесеобразования сокращается, цикловая продолжительность этого процесса в условиях гетерогенного заряда увеличивается, и в предельном случае часть смеси может

оказаться не подготовленной к сгоранию. Сгорание становится прерывистым, режим – неустойчивым [1, 2]. Опыт эксплуатации ДВС с НВБ показывает, что даже в условиях городской езды возникает необходимость кратковременного перевода работы ДВС с режима послойного на режим гомогенного смесеобразования (режимы ускорения автомобиля), что сопровождается потерей топливной экономичности. Понятно, что при расширении области устойчивой работы двигателя с послойным зарядом, необходимость в частом переводе его на менее экономичную работу с гомогенным зарядом в условиях городской езды может быть снижена.

Современные зарубежные автомобили с двигателями с НВБ имеют относительно высокую стоимость, в том числе, вследствие оснащения их дорогостоящими комбинированными системами нейтрализации. При отсутствии собственного производства систем очистки выпускных газов от NO_x накопительного типа с учетом их высокой стоимости и низкой надежности применение подобных систем на отечественном автомобильном транспорте малоперспективно. Поэтому поиск собственного адекватного по эффективности технического решения, способного заменить существующую зарубежную систему очистки ОГ, для отечественных двигателей с НВБ является актуальной необходимостью с учетом производственных возможностей и технологического состояния российского двигателестроения.

С учетом рассмотренного выше, предлагается концепция, которая в своей основе направлена на поиск рентабельного (энергетически выгодного) метода решения обозначенного комплекса проблемных вопросов. В общем виде она может быть сформулирована следующим образом. С целью снижения содержания в ОГ NO_x до уровня, позволяющего исключить из общей структуры комбинированной системы очистки нейтрализатор- NO_x , к рабочему телу ДВС с НВБ при его переходе на режимы эксплуатации с послойной организацией смесеобразования (рисунок 1) добавляется химически активный реагент.

При таком структурном преобразовании системы очистки ОГ автоматически исключается необходимость в организации высокотемпературных циклов для регенерации нейтрализатора- NO_x и энергетически убыточных режимов работы ДВС, и, как следствие, – улучшение топливно-экономических и ресурсных характеристик ДВС. Благодаря применению химического реагента дополнительно прогнозируется также снижение шума и выбросов твердых (сажевых) частиц, а также расширение области эксплуатационных режимов двигателя с послойным зарядом.

Схема, поясняющая концепцию практической реализации предлагаемого метода на двигателе с НВБ, приведена на рисунок 2. В качестве химического реагента используется водородосодержащие продукты, генерируемые в бортовом реакторе на основе конверсии метанола.

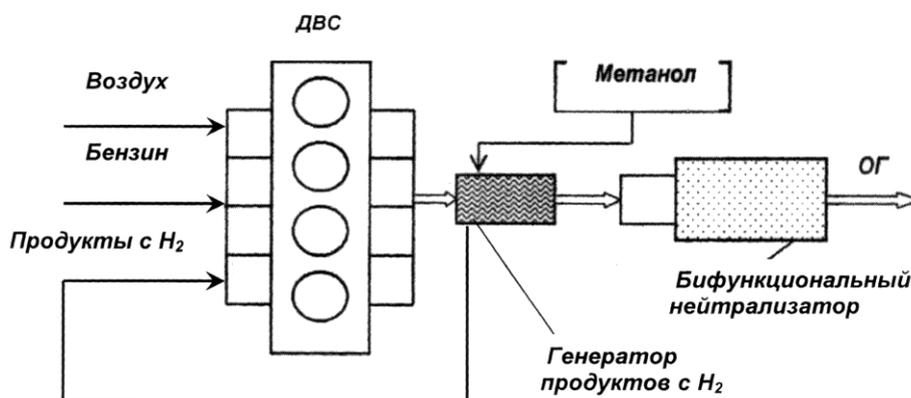


Рисунок 2 – Схема, поясняющая концепцию практической реализации предлагаемого метода на двигателе с НВБ

По своей методологической сути метод направлен на решение актуальной задачи отечественного двигателестроения – разработка научных и технических основ по созданию автомобильных бензиновых двигателей нового поколения с непосредственным впрыскиванием

топлива.

Обоснование выбора химического реагента

В рамках реализации предлагаемого метода предполагается использование синтезированного продукта с повышенным содержанием водорода в качестве активирующего реагента (рисунок 2), что обусловлено уникальными физико-химическими свойствами этого газа. По этим свойствам и доступности водород занимает особое место среди химических реагентов. Водород обладает практически неограниченными сырьевыми ресурсами и, как ожидается, станет широко используемым в двигателях транспортных средств в недалеком будущем.

К настоящему времени повсеместно наметилось одно из сформировавшихся направлений применения водорода, а именно, водород в различных комбинациях с углеводородными топливами [3-7]. Метод основан на известной способности добавок водородосодержащих продуктов к окислению (сгоранию) в условиях существенно обедненной смеси благодаря тому, что энергия, необходимая для начала реакции окисления водорода, примерно в 10 раз ниже той, которая необходима для углеводородов (таблица 1).

Таблица 1

Физико-химические свойства бензина и водорода:

Свойства	Бензин	H ₂
Молекулярная масса, кг/моль	117	2,015
Плотность, кг/м ³	670	0,086
Нижшая теплота сгорания, кДж/кг	44000	120085
Стехиометрическое соотношение воздух-топливо, кг/кг	14,95	34,2
Пределы воспламенения (объемная доля), %	1,2...6,0	4,0...75
Ламнарная скорость распространения пламени, м/с	0,37...0,43	1,9...2,7
Энергия воспламенения, мДж	0,25	0,02
Коэффициент диффузии, см ² /с	0,08	0,63
Толщина зоны гашения, мм	2,0	0,6

Обогащение топливовоздушной смеси водородом можно рассматривать как метод направленного химического воздействия на экологические и кинетические показатели процесса сгорания. Результаты выполненных работ [3-7], показали, что реакционное влияние водорода столь велико, что при относительно небольших его добавках к горючей смеси представляется возможным реализовать такие показатели рабочего цикла, которые недоступны любому другому реагенту.

Водород, обладает высокой скоростью диффузии (таблица 1), что обуславливает его способность за очень короткий промежуток времени образовывать с другими компонентами однородную смесь в цилиндре ДВС.

При горении водорода толщина зоны гашения (пристеночный слой, в котором не идут окислительные процессы) примерно в 5 раз меньше, чем у углеводородных топлив (таблица 1). Это свойство водорода предопределяет высокую его эффективность воздействия как химического реагента на кинетику сгорания смеси во всем объеме КС, включая и ее периферийные зоны с обедненной смесью. Ясно, что полнота сгорания при этом возрастает, эмиссия токсических веществ снижается.

Однако при всех преимуществах водорода его широкое применение на транспорте в настоящее время сдерживается рядом объективных, еще не решенных проблем. Важным фактором, способным стимулировать широкого использования водорода, является фактор рентабельности. Современные дорогие и энергоемкие промышленные способы получения водорода, его компримирования (или сжижения) и транспортировки обуславливают существенные эксплуатационные затраты (более 2000 руб./кВт), которые делают водород пока еще не конкурентоспособным среди других видов энергоносителей. Существенной проблемой является отсутствие инфраструктуры производства и распределения водорода в необходимых количествах для его массового использования на транспорте.

Выход из этой ситуации может быть найден, если аккумулялирование водорода на борту

автотранспортного средства (АТС) осуществлять в химически связанном состоянии в виде жидкого химического соединения. К потенциальным сырьевым источникам для получения водородосодержащих газов могут быть отнесены, в первую очередь, углеводородные соединения, имеющие простую молекулярную структуру и пониженную температуру диссоциации. Более предпочтительными для применения в ДВС являются соединения, имеющие уровни температуры диссоциации и тепловых эффектов в эндотермических реакциях разложения (затраты тепловой энергии на преодоление внутримолекулярных связей), соизмеримые с температурно-энергетическим потенциалом ОГ на выпуске двигателя. В этом случае обуславливается реальная возможность утилизации «бесплатной» тепловой энергии ОГ для организации конверсионного процесса, исключая необходимость в дополнительном источнике теплоты.

С учетом этого энергетически выгодно использовать легкие гомологи предельных углеводородов (алканов), низшие спирты и простые эфиры. Выбор сырьевого продукта для бортового генератора водорода является компромиссом, учитывающим доступность продукта и его массовое производство, температурные условия конверсии, содержание водорода, образующегося при конверсии, и стоимость.

Этиловый и особенно метиловый спирты являются весьма дешевыми и удобными носителями водорода, и уже относительно давно применяются в транспортных двигателях в качестве основных или частичных заменителей традиционных топлив. При этом в перспективе, очевидно, не исключается возможность применения в ДВС и ряда других продуктов по мере расширения развития технологий их получения и снижения стоимости.

Целесообразность использования метанола в качестве средства бортового аккумулирования (хранения) водорода обусловлена повышенным содержанием водорода (его молекулярная доля в соединении CH_3OH составляет 2/3). Массовый показатель среды аккумулирования водорода в виде жидкого метанола составляет порядка 8,5 кг/кг H_2 (в 8,5 кг метанола содержится 1 кг водорода). Массовое содержание водорода в единице объема жидкого метанола почти в 1,5 раза превышает плотность жидкого криогенного водорода [4]. Для условий эксплуатации АТС важно также и то, что хранение водорода в химически связанном состоянии в жидкой среде обуславливает высокую безопасность АТС при аварийных ситуациях.

При формировании системы средств и технических решений, реализующих предлагаемый метод, в данном исследовании были использованы хорошо зарекомендовавшие в исследовательской практике уже известные технологии изготовления бортовых генераторов водородосодержащего продукта. Эти технологии, разработанные в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», МГТУ «МАМИ» и РУДН, были усовершенствованы в последнее время с использованием результатов исследования, проведенных в рамках совместного сотрудничества в Институте катализа РАН и на Уральском химическом комбинате [3, 5, 6].

Анализ производительности бортовой системы синтеза водородосодержащих продуктов с учетом требований по реализации предлагаемого метода

Наибольшая глубина протекания химических реакций, обуславливающая максимальную степень конверсии φ_k метанола, может быть достигнута при определенном уровне энергетического состояния теплоносителя (ОГ) и его температуры в реакционной камере реактора. Необходимость в интенсивном подводе тепловой энергии к реакционной зоне вызвана, прежде всего, проявлением высокого эндотермического эффекта реакции разложения метанола (4,2 МДж/кг). Тепловая энергия необходима также для организации и других («вспомогательных») этапов конверсионного процесса: на предварительное нагревание жидкого метанола до температуры кипения, на его испарение, на повышение температуры паров до уровня температуры диссоциации, а также на компенсацию неизбежных тепловых потерь в окружающую среду через стенки реактора. Анализ показывает [3, 5, 6], что общие затраты тепловой энергии на организацию полностью завершено ($\varphi_k \sim 100\%$) процесса конвер-

сии 1 кг метанола достигают 7 МДж.

По условию энергетического баланса располагаемая тепловая энергия греющего теплоносителя (ОГ) должна соответствовать энергии, затрачиваемой на организацию конверсионного процесса. Кроме того, современные катализаторы конверсии метанола обеспечивают условия полной (завершенной) конверсии ($\varphi_k \sim 100\%$) при рабочих температурах порядка 3000С, что определяет минимально возможный рабочий уровень температуры выпускных газов двигателя, ниже которого реализация эффективного конверсионного процесса невозможна.

Поэтому оборудование автомобильного двигателя с НВБ системой генерирования водородосодержащих продуктов вызывает необходимость выявления необходимых условий эффективной ее работы в зависимости от режимов работы ДВС с организованным послойным распределением заряда. При этом ключевым вопросом по условию реализации принятой концепции является обеспечение ДВС необходимым количеством водородосодержащего реагента для достижения предельного уровня снижения NO_x . Понятно, что максимально возможный массовый расход метанола G_M , а следовательно, и водородосодержащего продукта через реактор зависит от энергетических возможностей теплоносителя, то есть разности энтальпий ОГ на входе и выходе реактора. Ранее была получена зависимость [5], устанавливающая функциональную связь между максимально возможной производительностью реактора по условию завершенности конверсионного процесса G_M и режимными параметрами ДВС.

Было установлено, что производительность реактора возрастает с повышением нагрузочного и скоростного режима ДВС вследствие увеличения расхода ОГ (G_{OG}) и их температуры (T'_{OG}). Очевидно, отдельно взятому режиму при прочих равных условиях соответствуют определенные значения G_{OG} и T'_{OG} .

Заметим, что в системе управления работой серийных ДВС с НВБ предусматривается штатная регистрация упомянутых выше параметров, а также моментов начала и завершения послойного смесеобразования, что облегчает организацию автоматического управления расходом водородосодержащих продуктов в системе питания ДВС. Ясно, что в этом случае нужно располагать конкретным алгоритмом управления расходом водородосодержащим продуктом, который может быть функционально скоординирован с программой управления топливоподачей.

С учетом целевой задачи исследования производительность реактора конверсии по выходу водорода для конкретного режима работы ДВС должна совокупно удовлетворять двум условиям:

- условию обеспечения необходимой добавки в двигатель, обуславливающей максимально возможный уровень снижения содержания NO_x в ОГ на любом эксплуатационном режиме работы ДВС с послойной организацией смесеобразования (необходимое условие);
- условию энергетического баланса конверсионного процесса с учетом достаточности располагаемой тепловой энергии ОГ для компенсации энергетических затрат на организацию эндотермического процесса конверсии (достаточное условие).

Проведена предварительная оценка (с последующей экспериментальной корректировкой) возможности удовлетворения этим условиям для всего диапазона изменения режимов работы двигателя с послойной организацией смесеобразования (рисунок 1) применительно к двигателю с НВБ типа BAG автомобиля Golf фирмы Volkswagen. Для этого ДВС в соответствии со штатной программой управления (Motronic MED 7.1.1. фирмы Bosch) установлен диапазон изменения характерных режимов работы с послойной организацией заряда в следующем интервале изменения среднего эффективного давления p_e и частоты вращения n :

а) минимальный предельный режим: $P_e = 0,1$ МПа при $n = 1000$ мин⁻¹;

б) максимальный предельный режим: $P_e = 0,4 \dots 0,5$ МПа при $n = 3000 \dots 3500$ мин⁻¹.

Многочисленными исследованиями [3, 5, 6] установлено, что оптимальная добавка водорода к рабочему телу по условию максимально возможного снижения эмиссии NO_x должно соответствовать (по энергетическому эквиваленту) 1,8% от основного топлива (бензина). Эти данные были получены при испытаниях двигателей, работающих на обедненных однородных (не расслоенных) смесях.

Применительно к системе горения расслоенной смеси в первом приближении были использованы эти известные данные, в качестве исходных (с последующим их уточнением по результатам эксперимента). Алгоритм управления расходом водорода в системе питания исследуемого двигателя по условию максимального снижения эмиссии оксидов азота приведен на рисунке 3.

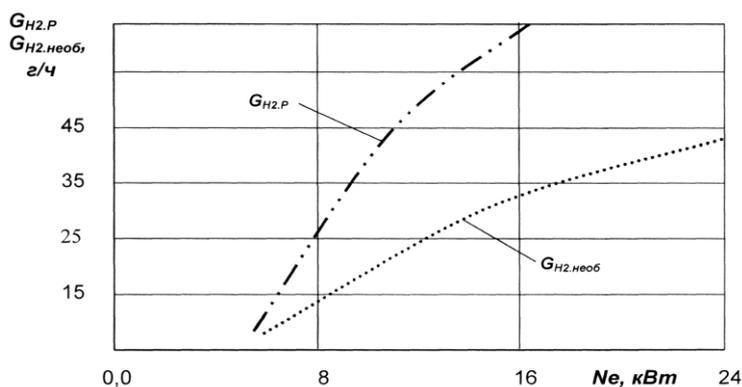


Рисунок 3 – Необходимый часовой расход водородного реагента $G_{H_2,необ}$ (по условию максимального снижения эмиссии NO_x) и потенциальная производительность реактора по водороду $G_{H_2,P}$ для условий работы двигателя BAG VW в области эксплуатационных режимов с послойной организацией смесеобразования

Для указанных выше предельно низких режимов работы двигателя с послойной организацией заряда расход ОГ G_{OG} (воздух + топливо) через реактор соответствует 18 кг/ч при средней замеренной температуре ОГ на входе в реактор $t'_{OG} = 3800^\circ\text{C}$ ($T'_{OG} = 653^\circ\text{K}$). По условию завершенности конверсионного процесса максимально возможный массовый расход метанола через систему конверсии при указанных параметрах теплоносителя определится, исходя из [3, 6]. Откуда следует, что потенциальная часовая производительность реактора по потребляемому метанолу $G_M = 0,205$ кг/ч. С учетом компонентного содержания водорода в продуктах конверсии метанола (12,5% по массе) производительность реактора по водороду $G_{H_2,P} = 0,025$ кг/ч.

По результатам приведенных расчетов можно сделать вывод, что для предельно низкого режима работы с послойным смесеобразованием исследуемого двигателя обнаруживается некоторое превышение расхода генерируемого в реакторе водорода по отношению к необходимому расходу по условию предельного снижения эмиссии NO_x .

Для максимально предельного уровня эксплуатационных режимов ДВС, работающего на расслоенном заряде, замеренная температура выпускных газов на входе в реактор соответствует 4200°C , а их расход равен 160 кг/ч.

Такие показатели теплоносителя позволяют осуществить эффективную конверсию метанола с его расходом через реактор $G_M = 2,74$ кг/ч, с выходом водорода $G_{H_2,P} = 0,34$ кг/ч.

Из рис. 3 видно, что потенциальная производительность реактора по водороду для данного режима ДВС существенно превышает необходимый расход $G_{H_2, \text{необ}}$ по условию максимального снижения эмиссии NO_x .

По результатам предварительного анализа можно сделать вывод, что при работе ДВС во всей области эксплуатационных режимов с расслоением заряда потенциальная производительность реактора по водороду с гарантированным запасом обеспечивает необходимый расход реагента по условию максимально возможного снижения содержания NO_x в ОГ. Избыточная потенциальная производительность реактора позволяет осуществлять в автоматическом режиме оптимальную инструментальную корректировку алгоритма управления расходом метанола (реагентом) в реальных условиях эксплуатации.

Апробация предложенного метода

Очевидно, что целесообразность практической реализации предлагаемого метода, как альтернативного варианта взамен существующей сорбционной системе очистки ОГ ДВС с НВБ, может быть оправданной при условии, если его эффективность по снижению эмиссии NO_x равнозначна эффективности заменяемой системы. Для обоснования этого условия проведено тестовое испытание.

На рисунке 4 представлены результаты эксперимента и расчета образования NO_x для двигателя типа BAG фирмы Volkswagen, работающего на режиме с организованным расслоением заряда. Расчеты текущей (по углу поворота коленчатого вала двигателя φ) концентрации NO_x в КС проводились по методике, разработанной с учетом особенностей сгорания для системы с послойным распределением смеси.

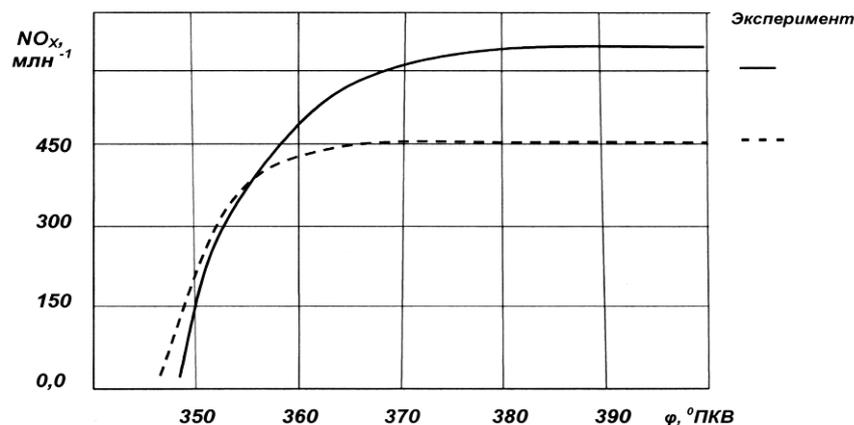


Рисунок 4 – Текущая концентрация NO_x в продуктах сгорания двигателя BAG VW

(режим с послойным смесеобразованием $P_e = 0,4$ МПа, $n = 3000$ мин⁻¹):
 — — исходный вариант, - - - с водородным реагентом

При сгорании не активированной (без реагента) расслоенной смеси результирующее содержание NO_x в продуктах сгорания соответствует 710 млн⁻¹. В присутствие водородного реагента процесс окисления азота в КС замедляется, и концентрация NO_x в продуктах сгорания снижается на 35% по сравнению с исходным вариантом (рисунок 4). Здесь же приведены данные по экспериментально замеренной концентрации NO_x в выпускных газах на выходе из ДВС, которые адекватно подтвердили эффективность воздействия водородного реагента на снижение эмиссии NO_x .

С целью выявления влияния реакционной способности добавки на эмиссию NO_x в условиях сгорания расслоенных смесей различного качественного состава проведены стендовые испытания двигателя для обозначенных выше характерных режимов, результаты которых показали следующее:

- добавка к рабочему телу химического реагента позволяет уменьшить эмиссию NO_x на 35% для предельно максимального режима;
- для минимально предельного режима выбросы NO_x оказались незначительными, в пределах точности измерения газоаналитической системы.

При испытаниях на режиме холостого хода показания системы измерения NO_x визуально не регистрировались, то есть оказались близки к нулевой отметке.

Таким образом установлено, что с повышением мощности ДВС, то есть по мере обогащения смеси эмиссия NO_x возрастает. Наибольший выход NO_x регистрируется на предельно максимальном режиме работы ДВС с послойной организацией заряда.

В ходе экспериментального исследования было выявлено, что применение водородного реагента обуславливает возможность расширения диапазона мощности для штатных эксплуатационных режимов с послойной организацией заряда более, чем на 30% при сохранении цикловой стабильности сгорания (идентичности воспроизведения чередующихся циклов на мониторе электронной системы индицирования).

Благодаря повышению реакционной способности смеси отмеченное улучшение экологических качеств исследуемого ДВС на режимах с послойной организацией заряда одновременно сопровождалось повышением показателей его топливной экономичности. По результатам сравнительных испытаний ДВС ВAG VW установлено, что применение добавки водородного реагента к рабочей смеси позволяет снизить удельный эффективный расход топлива на 3,3%.

Снижение расхода топлива связано (как было зарегистрировано данными индицирования рабочего цикла) с особенностями тепловыделения (его длительность уменьшается), снижением тепловых потерь, повышением полноты сгорания существенно обедненной смеси (особенно, на проблемной заключительной стадии сгорания расслоенного заряда) за счет повышения реакционной способности смеси.

Заметим, что улучшение эффективных показателей рабочего цикла ДВС в условиях эксплуатации кроме эффекта активации смеси может быть связано еще и с тем, что из состава его системы выпуска устранен нейтрализатор накопительного типа, газодинамическое сопротивление которого в 2,5 раза выше по сравнению с малогабаритным реактором конверсии метанола. Вследствие этого снижения газодинамического сопротивления выпускного тракта уменьшились насосные потери.

Следует заметить, что на режимах работы ДВС с гомогенным смесеобразованием ($\alpha = 1$) вследствие отсутствия нейтрализатора накопительного типа и выключения из работы реактора конверсии метанола уровень газодинамических потерь (противодавления) в системе выпуска еще более снизится, поэтому следует ожидать более заметного снижения путевого расхода топлива во всем поле изменения ездовых режимов автомобиля.

На завершающем этапе тестирования предлагаемого метода проведены испытания по ездовому циклу (New European Driving Cycle) автомобиля с ДВС с организацией рабочего процесса с активированным сгоранием. Установлено, что в диапазоне режимов с послойным смесеобразованием по экологическим качествам этот автомобиль не уступает исходному (серийному) прототипу, полностью удовлетворяя нормам ЕВРО-4 (рисунок 5). Заметим, что при проведении испытаний в соответствии с предложенной концепцией была использована система нейтрализации с упрощенной структурой (с одним бифункциональным нейтрализатором), а система рециркуляции ОГ работала в штатном режиме.

Заключение

По результатам экспериментальной проверки концепции предложенного метода установлено, что работа двигателя с активированным процессом сгорания характеризуется стабильной работой в более широком диапазоне эксплуатационных режимов с расслоением заряда, чем при работе в штатном варианте. Установлено, что наблюдается практически полное отсутствие пропусков воспламенения и рывков при переходе с гомогенного режима работы на послойное (гетерогенное) смесеобразование.

Предлагаемая «водородная» стратегия улучшения показателей работы ДВС с НВБ является, на наш взгляд, наиболее экономически (по стоимости системы нейтрализации) и энергетически (по затратам энергоносителя) выгодной, а следовательно, перспективной с учетом этих свойств.

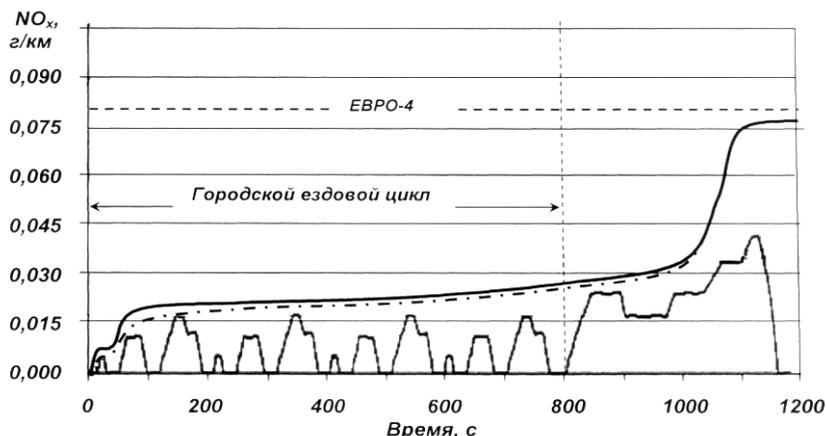


Рисунок 5 – Совокупные выбросы NO_x за период ездового цикла New European Driving Cycle Правил 83-05 ЕЭК ООН (ЕВРО-4) автомобилем Golf VW с двигателем BAG: - - - - с рабочим процессом с активированным сгоранием и упрощенной системой нейтрализации; ——— – серийной комплектации.

Улучшение экологических качеств ДВС с НВБ достигаются с использованием небольшой химической энергии водорода по отношению к энергии всего израсходованного базового топлива (менее 2%). Достаточно компактный и дешевый реактор конверсии метанола, включаемый в работу только на режимах ДВС с послойным зарядом, может обеспечить необходимое количество водородосодержащего газа для эффективной реализации предлагаемого метода.

Примененный способ бортового аккумулирования водорода в химически связанном состоянии в жидкой среде обеспечивает высокую эксплуатационную безопасность АТС по сравнению, например, со способом баллонного хранения водорода.

Концепция высокоэффективного химического воздействия на процессы горения углеводородного топлива с использованием водородного реагента является приоритетной, потому что только водород, как химический реагент, обладает столь высокой эффективностью.

Важным достоинством предлагаемого метода, способствующим снижению технических и экономических затрат при его реализации на транспорте, является то, что он может проводиться на базе уже накопленного отечественного опыта по созданию высокоэффективных бортовых систем получения водородного реагента.

В рамках реализации предлагаемого метода можно спрогнозировать снижение совокупного расхода топлива автомобильного ДВС с НВБ в условиях городской езды по целому ряду факторов:

1. отказ от сорбционного нейтрализатора- NO_x исключены энергетически затратные режимы работы двигателя (угол зажигания ~ 100 после ВМТ, $\alpha < 1$), необходимые для его периодической регенерации;
2. создание условий для уменьшения количества переводов ДВС на менее экономичный режим гомогенного смесеобразования ($\alpha=1$) за счет расширения области эксплуатационных режимов его работы на расслоенных смесях;
3. совершенствование кинетических показателей цикла и повышение полноты сгорания существенно обедненной смеси во всем объеме КС;
4. снижение уровня газодинамических потерь в системе выпуска и, как следствие, снижение путевого расхода топлива во всем диапазоне изменения ездовых режимов автомобиля.

По предварительной оценке прогнозируемое снижение совокупного расхода топлива автомобильного ДВС с НВБ в условиях городской езды составит не менее 5...7%.

С учетом современного технико-экономического состояния отечественного автотранспортного комплекса и уровня технологической базы заводов-изготовителей данный метод обуславливает дополнительный ряд преимуществ.

За счет использования высокоэффективного химического реагента при сохранении экологических качеств ДВС с НВБ удастся отказаться от дорогостоящей накопительной системы очистки ОГ от NO_x и, тем самым, снизить себестоимость системы нейтрализации (по предварительной оценке на 40%). Надежность и долговечность предлагаемой системы с упрощенной структурой становятся выше, чем у существующей комплексной системы очистки зарубежного производства. Отпадает необходимость существенного переоснащения отечественной технологической базы для производства сложных и дорогих компонентов комплексных систем нейтрализации ОГ, аналогичных зарубежным вариантам.

Создаются предпосылки для расширения эксплуатационной области режимов с простой организацией заряда со сверхобедненным составом смеси и, следовательно, для соответствующего снижения расхода топлива.

Снижается тепловая нагрузка и, как можно с уверенностью предположить, предотвращается термоусталостное разрушение наиболее теплонапряженных деталей КС двигателя за счет исключения высокотемпературных циклов регенерации нейтрализатора- NO_x и, тем самым, повышаются его ресурсные характеристики и двигателя в целом.

Снижаются максимальное давление сгорания гетерогенной смеси, скорость изменения тепловыделения и давления в КС (по данным индицирования рабочего цикла) и, как следствие, уменьшаются нагрузки на детали КШМ, уровень шума.

Важным стимулом дальнейшего развития «водородной» концепции повышения эффективности ДВС транспортных средств является и то, что методологически схожие версии получают свое развитие и за рубежом. Так, например, в мировой исследовательской практике известен ряд работ (Justin Fulton и др.), посвященных проблеме использования баллонного водорода для совершенствования показателей работы бензиновых двигателей [7]. Очевидно, что подобный вариант подхода к решению обсуждаемой проблемы с бортовым баллонным аккумулярованием водорода менее рентабелен и сопряжен с проявлением сложных проблем эксплуатационной безопасности.

Несмотря на отмеченные недостатки, достигнутая совокупная экологическая эффективность (в рамках всего ездового цикла) от реализации указанных зарубежных вариантов «водородной» стратегии высока. Этот факт еще раз подтверждает наши предположения о перспективности обсуждаемого метода совершенствования показателей автомобильных ДВС с НВБ с помощью водородного реагента, вне зависимости от того, с помощью каких средств и технических решений он получен.

В заключение следует подчеркнуть, что рассмотренные проблемные вопросы, связанные с разработкой перспективных отечественных двигателей с НВБ, стимулируют необходимость поиска средств и новых технических решений, приемлемых для отечественного двигателестроения. При этом следует отметить неприемлемость прямого копирования зарубежных решений в отечественной практике, не только из-за высоких финансовых затрат для их реализации, но и с учетом отсутствия технологии и необходимых материалов для их производства, качества российского бензина и др.

Реализация успешного поиска экономически оправданных и эффективных решений обсужденных в данной статье вопросов, в том числе как альтернативы - на основе предлагаемого метода, позволит при минимальных финансовых затратах более оперативно решить актуальную проблему отечественного двигателестроения – создание российского автомобильного бензинового двигателя нового поколения с внутренним смесеобразованием.

Литература

1. Winterkorn M., Spiegel L., Bohne P., Sohlke G. Der Lupo FS1 von Volkswagen - so sparsam ist sportlich // ATZ.- № 10.- Teil 1. 2000. S. 832-841.
2. Ando A., Noma K., Iida K., Nakayama O., Yamauchi T. Mitsubishi GDI Engine Strategies to meet European Requirements// Proceedings AVL «Engine and Environment».- Graz, 1997.- V.

П.- Р. 55-70.

3. Каменев В.Ф., Фомин В.М., Хрипач Н.А. Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на водородно-топливных композициях // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE).- № 7. 2005. с. 32-42.
4. Малышенко С.П., Назарова О.В. Аккумуляирование водорода//Атомно-водородная энергетика и технология. – Сб. статей. Вып. 8. - М.: Энергоатомиздат, 1988. с. 155-205.
5. Fomin V.M. and Makunin A.V. Thermo chemical recovery of heat contained in exhaust gases of internal combustion engines (a general approach to the problem of recovery of heat contained in exhaust gases) // Theoretical foundations of chemical engineering.-Vol.43. № 5. 2009. P.p.834-840.
6. Фомин В.М. Системы химического воздействия на параметры рабочего цикла двигателя // Тракторы и сельскохозяйственные машины.-2004. № 6. с. 34-38.
7. Justin Fulton. Hydrogen for cold starting and catalyst heating in a methanol vehicle // SAE Technical Paper Series № 951956. 1995. Pp. 2-12.

Разработка и исследование математической модели полноприводного четырехосного автомобиля с электротрансмиссией

к.ф.-м.н. доц. Кулаков Н.А., к.т.н. проф. Лепешкин А.В., Черанев С.В.
МГТУ «МАМИ»

(495) 223-05-23, доб. 1154, 1426, lep@mami.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследований разработанной математической модели прямолинейного движения полноприводной четырехосной машины с индивидуальным регулируемым приводом ведущих колес от электрической трансмиссией, позволяющей проводить оценку тягово-энергетической эффективности работы этой машины в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: многоприводные колесные машины, индивидуальный привод ведущих колес, регулируемая электрическая трансмиссия, критерии оценки энергоэффективности.

В данной статье приведены данные научных исследований, полученные при выполнении Государственного контракта № 579 от 31.03.2004 г. в рамках Гособоронзаказа, а также Государственного контракта № П1131 от 02.06.2010 на поисковые научно-исследовательские работы для государственных нужд по заданию Министерства образования и науки РФ на 2010 – 2012 г.г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Данная математическая модель разработана с целью выполнения исследований, посвященных созданию системы автоматического адаптивного (СААУ) управления распределением мощности в электрической трансмиссии (ЭТ) индивидуального привода ведущих колес четырехосного полноприводного автомобиля снаряженной массы 20 тонн. ЭТ автомобиля включает дизель-генератор, накопитель электрической энергии, восемь одинаковых тяговых электродвигателей (ТЭД) (по одному на каждое колесо автомобиля) и систему управления.

Основной отличительной особенностью этого автомобиля является то, что конструкция его трансмиссии позволяет управлять режимом работы каждого ведущего колеса. Поиск оптимального закона управления в разных условиях движения автомобиля является главной задачей исследований.

Математическая модель движения автомобиля, используемая при выполнении таких исследований, должна позволять имитировать разные условия работы машины, являющиеся следствием как возмущающих воздействий со стороны дороги, так и управляющих воздействий со стороны водителя. В то же время математическая модель должна позволять осуществлять поиск оптимальных значений управляющих сигналов, формируемых системой автома-