

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ БЕНЗИНА

**В.М. Фомин, Х.Ю. Рамзи,
А.С. Платунов**

Кафедра эксплуатации автотранспортных средств
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 8, корпус 3, Москва, Россия, 117198

Анализируются вопросы, связанные с перспективой разработки отечественных автомобильных бензиновых двигателей нового поколения с внутренним смесеобразованием, которые стимулируют необходимость поиска средств и новых технических решений, приемлемых для отечественного двигателестроения. В качестве альтернативного варианта предложен метод совершенствования показателей работы двигателя данного типа, основанный на использовании водорода в качестве химического реагента.

Ключевые слова: нейтрализатор накопительного типа, послыйное смесеобразование, водород, регенерация нейтрализатора, реактор конверсии метанола, продукты конверсии.

Формулировка концепции

Высокий уровень топливно-экономических показателей бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием бензина (НВБ) стимулирует 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. Отметим, что практически все современные автомобили фирмы Volkswagen, импортируемые в Россию, оснащены двигателями с НВБ.

В целях ликвидации сложившегося отставания в данной области отечественного двигателестроения и повышения конкурентоспособности ряд российских научных центров и производителей, несмотря на скудное финансирование, проводят работы по разработке ДВС с НВБ. Перспективы производства и внедрения ДВС с НВБ на отечественном автомобильном транспорте связаны с финансовыми проблемами, а также с решением целого ряда серьезных технических и технологических проблем.

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

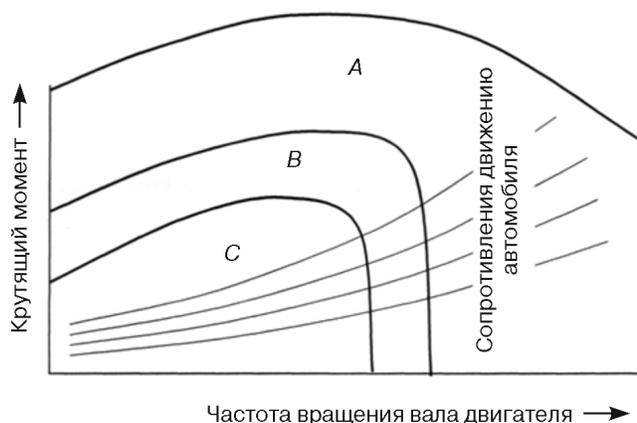


Рис. 1. Характерные эксплуатационные режимы работы автомобильного двигателя с непосредственным впрыскиванием бензина:

- A — область работы на режимах с организованным гомогенным смесеобразованием при $\alpha = 1$ (скоростная, загородная езда);
- B — область работы на режимах с организованным гомогенным смесеобразованием при $\alpha \geq 1$ с регулируемой рециркуляцией ОГ (область переходных режимов);
- C — область работы на режимах с организованным расслоением гетерогенной смеси при $\alpha \gg 1$ с рециркуляцией ОГ (городская езда)

2. 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, т.е. удаления накопленных в нем соединений NO_x и серы при рабочей температуре свыше 650 °С. 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. Кроме того, при многократном повторении эффект полной десульфатизации катализатора уже не достигается.

3. 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 $\sim 10^\circ$ после ВМТ, $\alpha < 1$), что негативно отражается на ресурсных и топливно-экономических характеристиках двигателя, а также на процессе «старения» каталитического блока. Отечественный опыт показывает, что эксплуатация автомобилей с ДВС с НВБ в условиях российских дорог приводит к потере заявленной фирмой-изготовителем эффективности системы очистки по оксидам азота. Можно предположить, что в этой ситуации проявляется пониженное качество российского бензина, но в любом случае для отечественных разработчиков перспективных ДВС с НВБ данная проблема потребует поиска адекватного решения.

4. 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).

5. Устойчивая работа двигателя с НВБ на режимах с послойной организацией заряда возможна в ограниченной области (см. рис. 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.

6. Современные зарубежные автомобили с двигателями с НВБ имеют относительно высокую стоимость, в частности, 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 перспективных 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 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 добавляется химически активный реагент (рис. 2). 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 дисперсных (сажевых) частиц, а также расширение области эксплуатационных режимов двигателя с послойным зарядом.

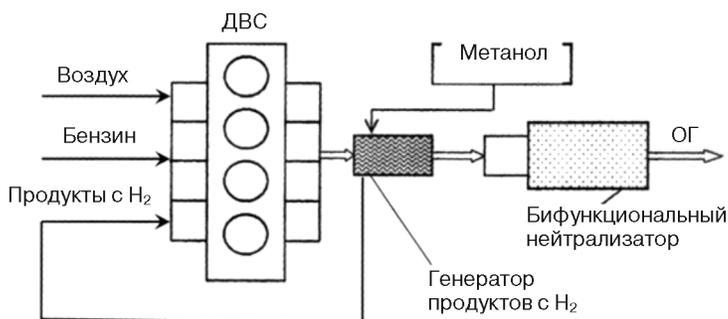


Рис. 2. Схема, поясняющая концепцию реализации предлагаемого метода на двигателе с НВБ

Обоснование выбора химического реагента

В рамках реализации данной концепции предполагается использование синтезированного продукта с повышенным содержанием водорода в качестве химического реагента, обладающего уникальными физико-химическими свойствами, благодаря которым 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 водородного компонента в составе смесевой композиции 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 (табл. 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
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	44 000	120 085
Стехиометрическое соотношение воздух-топливо, кг/кг	14,95	34,2
Пределы воспламенения (объемная доля), %	1,2...6,0	4,0...75
Ламинарная 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 топливоздушной 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 (см. табл. 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 (см. табл. 1). Это свойство водорода предопределяет высокую его эффективность воздействия как химического реагента на кинетику сгорания смеси во всем объеме камеры сгорания (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, способствующим стимулированию 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 аккумулирование водорода на борту автотранспортного средства (АТС) осуществлять в химически связанном состоянии в виде жидкого химического соединения. 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 появляется 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, простые эфиры и др. 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 не исключается возможность применения в качестве средства бортового аккумулирования (хранения) водорода и ряда других продуктов по мере расширения развития технологий их получения и снижения стоимости.

Целесообразность использования метанола в качестве такого средства обусловлена повышенным содержанием водорода (его молекулярная доля в соединении CH_3OH составляет $\frac{2}{3}$). 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 водо-

рода [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 предлагаемую концепцию, 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 исследований, проведенных в рамках совместного сотрудничества в Институте катализа РАН и на Уральском химическом комбинате [3; 5; 6].

Анализ производительности бортовой системы генерирования водородосодержащих продуктов с учетом требований по реализации предлагаемой концепции

Наибольшая глубина протекания химических реакций, обуславливающая максимальную степень конверсии φ_k метанола, может быть достигнута при определенном уровне энергетического состояния греющего 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: предварительного нагревания жидкого метанола до температуры кипения, его испарения, повышения температуры паров до уровня температуры диссоциации, а также компенсации неизбежных тепловых потерь в окружающую среду через стенки реактора. Анализ показывает [3; 5; 6], что общие затраты тепловой энергии на организацию полностью завершеного ($\varphi_k \sim 100\%$) процесса конверсии 1 кг метанола достигают 7 МДж.

По условию энергетического баланса располагаемая тепловая энергия греющего теплоносителя 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 300 °С, что определяет минимально возможный рабочий уровень температуры выпускных газов двигателя, ниже которого реализация эффективного конверсионного процесса невозможна.

В связи с этим оборудование автомобильного двигателя с НВБ системой генерирования водородосодержащих продуктов вызывает необходимость выявления 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, т.е. разности энтальпий ОГ на входе и выходе реактора. Ранее была получена зависимость [5], устанавли-

вающая функциональную связь между максимально возможной производительностью реактора по условию завершения 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 водородосодержащего продукта, 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:

— обеспечение необходимой добавки реагента к рабочему телу, обуславливающей максимально возможный уровень снижения эмиссии NO_x на любом эксплуатационном режиме работы ДВС с послойной организацией смесеобразования (необходимое условие);

— энергетический баланс конверсионного процесса с учетом достаточности располагаемой тепловой энергии ОГ для компенсации энергетических затрат на организацию эндотермических реакций 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 (см. рис. 1) применительно к объекту исследования — двигателю с НВБ типа ВАG 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 :

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

максимальный предельный режим: $p_e = 0,4$ МПа при $n = 3000$ мин⁻¹.

Выбор оптимальной величины добавки реагента к рабочему телу — один из ключевых вопросов для успешной реализации концепции предлагаемого метода. Следует иметь в виду, что речь идет о процессах сгорания существенно обедненных смесей ($\alpha = 2,3...2,5$) и различное количество водородного реагента в ее составе не однозначно проявляется в кинетике протекания этого процесса. Если добавка H_2 значительная и по энергетическому эквиваленту соизмерима с основным топливом, то данный энергоноситель выступает в роли самостоятельного (равноправного) компонента смеси топлива. Однако в этом случае приходится учитывать, что повышается уровень температуры рабочего тела и максимального давления сгорания и, как следствие, увеличивается эмиссия NO_x . Другой характер

приобретает процесс сгорания, если менее значительная добавка H_2 оптимизирована и согласована по условию предельного снижения эмиссии NO_x . В этом случае влияние H_2 как химического реагента проявляется главным образом в кинетическом механизме окисления азота и активации сгорания обедненных смесей.

Многочисленными исследованиями [3; 5; 6] установлено, что оптимальная добавка водорода ($G_{H_2, \text{необ}}$) 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 (нерасслоенных) смесях.

Применительно к системе горения расслоенной смеси в первом приближении были использованы эти известные данные, в качестве исходных (с последующим уточнением экспериментом). С учетом этих данных при известных штатных характеристиках топливоподачи был разработан алгоритм управления расходом водорода ($G_{H_2, \text{необ}} = f(N_e)$) в системе питания исследуемого двигателя по условию максимального снижения эмиссии оксидов азота (рис. 3).

Для указанного выше предельно низкого режима работы исследуемого двигателя с послышной организацией заряда были замерены расход ОГ G_{OG} и среднее значение температуры ОГ на входе в реактор T_{OG} . По условию завершенности конверсионного процесса максимально возможный массовый расход метанола через систему конверсии при замеренных параметрах теплоносителя определялся исходя из [3; 6]. Установлено, 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. Следовательно, для данного режима работы ДВС обнаруживается некоторое превышение расхода генерируемого в реакторе водорода по отношению к необходимому расходу по условию предельного снижения эмиссии NO_x (рис. 3).

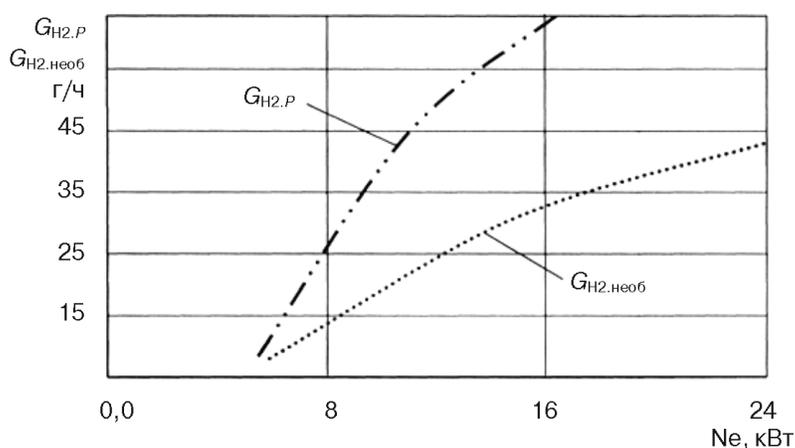


Рис. 3. Необходимый часовой расход водородного реагента $G_{H_2, \text{необ}}$ (по условию предельного снижения эмиссии NO_x) и потенциальная производительность реактора по водороду $G_{H_2, P}$ для условий работы двигателя BAW VW в области эксплуатационных режимов с послышной организацией смесеобразования

Для максимально предельного уровня эксплуатационных режимов ДВС, работающего на расслоенном заряде, энергетические показатели теплоносителя ($G_{\text{ОГ}}$ и $T_{\text{ОГ}}$) становятся выше, что позволяет осуществить эффективную конверсию метанола с его расходом через реактор $G_{\text{М}} = 2,74$ кг/ч, с выходом водорода $G_{\text{H}_2, \text{P}} = 0,34$ кг/ч. Из рис. 3 видно, что потенциальная производительность реактора по водороду для данного режима ДВС существенно превышает необходимый расход $G_{\text{H}_2, \text{необ}}$ 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 предельно возможного снижения содержания NO_x в ОГ. Избыточная потенциальная производительность реактора позволяет осуществлять в автоматическом режиме оптимальную инструментальную корректировку алгоритма управления расходом метанола (реагента) в реальных условиях эксплуатации.

Апробация предложенной концепции

Очевидно, что целесообразность практической реализации концепции 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.

Испытание проводилось в автомобильном центре Auto Hansa (московский филиал фирмы Volkswagen). На рис. 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 методики, разработанной с учетом особенностей сгорания для системы с полойным распределением смеси.

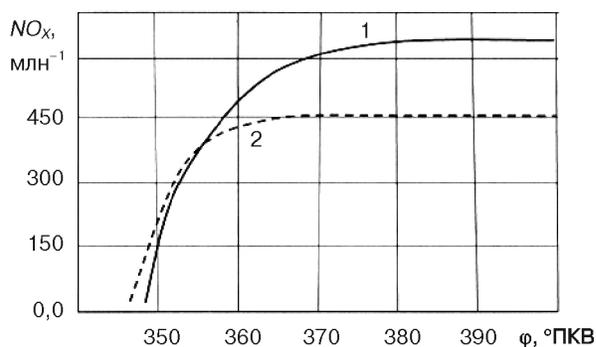


Рис. 4. Текущая концентрация NO_x в продуктах сгорания двигателя BAG VW (режим с полойным смесеобразованием $P_e = 0,4$ МПа, $n = 3000$ мин⁻¹):
1 — исходный вариант; 2 — вариант с водородным реагентом

При сгорании неактивированной (без реагента) расслоенной смеси результирующее содержание NO_x в продуктах сгорания соответствует 710 млн⁻¹. В при-

сутствии водородного реагента процесс окисления азота в КС замедляется и концентрация NO_x в продуктах сгорания снижается на 35% по сравнению с исходным вариантом (рис. 4). Здесь же приведены данные по экспериментально замеренной концентрации NO_x в выпускных газах на выходе из ДВС, которые практически адекватно подтвердили эффективность воздействия водородного реагента на снижение эмиссии NO_x .

По результатам стендовых испытания двигателя установлено также, что 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, т.е. оказались близки к нулевой отметке. Таким образом, установлено, что с повышением мощности ДВС, т.е. по мере обогащения смеси, эмиссия NO_x возрастает. Наибольший выход NO_x регистрируется на предельно максимальном режиме работы ДВС с послышной организацией заряда.

В ходе экспериментального исследования было выявлено, что применение водородного реагента обуславливает возможность расширения диапазона мощности для штатных эксплуатационных режимов с послышной 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 послышной организацией заряда одновременно сопровождалось повышением показателей его топливной экономичности. По результатам испытаний ДВС ВАG VW установлено, что применение добавки водородного реагента к рабочей смеси позволяет снизить удельный эффективный расход топлива в среднем 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 дополнительное улучшение топливно-экономических показателей ДВС в условиях эксплуатации может быть получено благодаря тому, 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. Как следствие — снижается газодинамическое сопротивление выпускного тракта, уменьшаются насосные потери.

На завершающем этапе тестирования предлагаемого метода проведены испытания по ездовому циклу (New European Driving Cycle) автомобиля Golf VW с двигателем ВАG с использованием водородного реагента. Установлено, что в диапазоне режимов с послышным смесеобразованием по экологическим качествам этот автомобиль не уступает исходному (серийному) прототипу, полностью удовлетворяя нормам ЕВРО-4 (рис. 5).

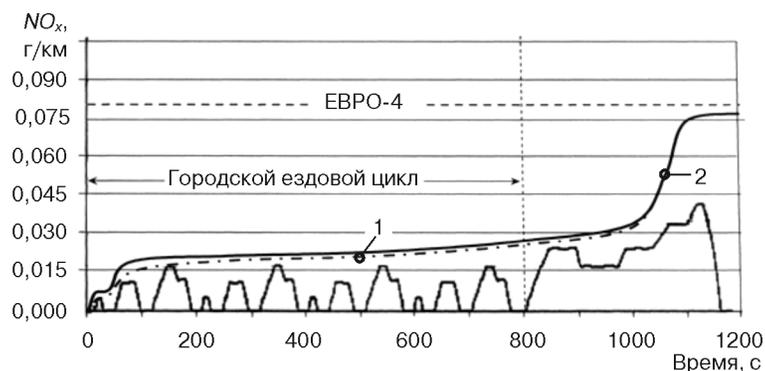


Рис. 5. Совокупные выбросы NO_x за период ездового цикла New European Driving Cycle Правил 83—05 ЕЭК ООН (ЕВРО-4) автомобилем Golf VW с двигателем BAG:

1 — с использованием водородного реагента и без накопительного нейтрализатора- NO_x ; 2 — серийной комплектации

Следует заметить, что на повышенных нагрузочных режимах работы ДВС с гомогенным смесеобразованием (см. рис. 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.

При проведении испытаний в соответствии с предложенной концепцией была использована система нейтрализации с упрощенной структурой (со штатным бифункциональным нейтрализатором, без нейтрализатора- NO_x), а система рециркуляции ОГ работала в штатном режиме.

Заключение

По результатам экспериментальной проверки концепции предложенного метода установлено, что работа двигателя с НВБ с использованием водородного реагента 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» концепция 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. Улучшение экологических качеств ДВС с НВБ достигается за счет использования 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 послойной организацией заряда, 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 реакционно-химического воздействия водородного реагента на процессы горения углеводородного топлива в составе существенно обедненных смесей является наиболее приоритетной, потому что только водород среди других известных химических реагентов обладает столь высокой эффективностью, позволяющей осуществить оптимальное управление кинетическими показателями рабочего цикла. Вследствие повышения реакционной способности обедненной гетерогенной смеси снижаются максимальное давление сгорания, скорость изменения тепловыделения и давления в КС (по данным индицирования рабочего цикла) и, как следствие, уменьшаются нагрузки на детали КШМ, а также уровень шума.

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:

- вследствие отказа от сорбционного нейтрализатора - NO_x исключены энергетически затратные режимы работы двигателя (угол зажигания $\sim 10^\circ$ после ВМТ, $\alpha < 1$), необходимые для его периодической регенерации;

- созданы условия для уменьшения количества переводов ДВС на менее экономичный режим гомогенного смесеобразования ($\alpha = 1$) за счет расширения области эксплуатационных режимов его работы на расслоенных смесях;

- совершенствования кинетических показателей цикла и повышения полноты сгорания существенно обедненной смеси во всем (включая пристеночные и заземленные зоны) объеме КС;

- снижения уровня газодинамических потерь в системе выпуска и, как следствие, снижения 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.

Благодаря исключению необходимости проведения высокотемпературных циклов регенерации нейтрализатора- NO_x снижается тепловая нагрузка и, как можно с уверенностью предположить, предотвращается возможность термоусталостного разрушения наиболее теплонапряженных деталей КС двигателя и тем самым повышаются ресурсные характеристики ДВС.

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, в мировой исследовательской практике известен ряд работ (Justin Fulton и др.), посвященных проблеме использования баллонного водорода для совершенствования показателей работы автомобильных 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 технологических средств он получен.

В заключение следует подчеркнуть, что рассмотренные 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.

Экономически оправданное и эффективное решение обсужденных в данной статье вопросов 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. — 2000. — N 10. — Teil 1. — 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. II. — P. 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 (ISJAEЕ). — 2005. — № 7. — С. 32—42.

- [4] *Мальшенко С.П., Назарова О.В.* Аккумуляция 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. — 2009. — Vol. 43. — No 5. — 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 No. 951956. — 1995. — P. 2—12.

DEVELOPMENT OF THE AUTOMOBILE EXPLOSION ENGINE PERFORMANCE WITH DIRECT INJECTION OF GASOLINE

V.M. Fomin, H.J. Ramzi, A.S. Platunov

Department of Motor Vehicles Operating
Engineering Faculty

People's Friendship University of Russia
Mikluxe-Maklaya str., 8-3, Moscow, Russia, 117198

Here are analyzed the problem questions which are connected with perspective working out of domestic automobile petrol engines of new generation with internal carburetion which stimulates necessity to search the means and the new technical decisions which can be suitable for domestic engine engineering.

The method of developing automobile explosion engine performance of the given type has been suggested as an alternative variant, which is based on the use of hydrogen as a chemical reagent.

Key words: Neutralizer of memory type, level-by-level carburetion, hydrogen, neutralizer regeneration, the methanol conversion reactor, conversion products.