

Поиск путей вхождения отдельных видов альтернативных энергоресурсов в сферу перспективного освоения водородной энергетики на отечественном транспорте

д.т.н. проф. Фомин В.М., к.т.н. доц. Хрипач Н.А.
Университет машиностроения
+ 7(915)2114415, mixalichDM@mail.ru

Аннотация. Анализируются результаты работ, проведенных в среде отечественной исследовательской практики, по изучению эксплуатационных свойств и применению синтезируемых в бортовых системах водородосодержащих газов в качестве основного или частичного заменителя традиционных моторных топлив. Обосновывается потенциальная возможность реального вхождения в ближайшие годы отдельных видов водородных энергоресурсов в структуру национальной транспортной энергетики.

Ключевые слова: альтернативные энергоносители, синтезированный газ, аккумулярование водорода, твердая непищевая биомасса, катализатор, метанол, конверсия.

Неотложное решение социально важных проблем повышения экологической безопасности и сохранения природных ресурсов обуславливает необходимость к переходу на альтернативную экологически совершенную энергетику и высокоэффективные технологии для ее реализации на транспорте, среди которых особое место отводится водородной энергетике. Увеличение доли водородной энергетики в сфере отечественного транспортного энергопотребления способно существенно повлиять на структуру потребления энергетических источников на органической основе, а также на результирующие показатели по повышению экологической и энергетической безопасности в среде эксплуатации автотранспортного комплекса.

Однако применение водорода в качестве энергоносителя для автотранспортных средств (АТС) в настоящее время связано с решением ряда сложных проблем. Существенной национальной проблемой применения водорода является отсутствие инфраструктуры его производства и распределения в необходимых количествах для его массового использования на транспорте. Известные системы транспортирования и бортового хранения водорода неприемлемы для АТС либо вследствие малой энергоемкости, либо вследствие технической сложности и недостаточной эксплуатационной безопасности.

Одним из радикальных решений этих проблем является реализация бортового аккумулярования (хранения) водорода в химически связанном состоянии, что существенно минимизирует затраты в сфере энергообеспечения и в инфраструктуре распределения водорода (АЗС), решает проблему эксплуатационной безопасности. Производство этого газа непосредственно на борту АТС, в свою очередь, обуславливает необходимость разработки эффективных методов, процессов и технических средств для его синтеза.

Основными характеристиками исходного, сырьевого продукта, определяющими его пригодность для производства водорода на борту АТС, являются:

- содержание водорода в продукте;
- сложность и стоимость переработки продукта;
- наличие в перспективе широкой сырьевой базы, в том числе и возобновляемого сырья;
- стоимость продукта.

Среди перспективных носителей водорода в мировой исследовательской практике отводится биомассе – неисчерпаемого (ежегодно возобновляемого) растительного продукта. Следует отметить, что использование биомассы, обеспечивает поддержание баланса в атмосфере диоксида углерода CO_2 , так как его выбросы с продуктами сгорания практически полностью компенсируются в процессах фотосинтеза при выращивании биологического сырьевого продукта. Это способствует решению одной из важнейших мировых проблем – уменьшению парникового эффекта в биосфере.

Наиболее экономически оправдано осуществлять перевод энергетических установок, потребляемых нефтяное топливо, на работу на топливе местного производства. Целесообразность такого подхода обусловлена, прежде всего, тем, что практически все регионы России имеют в своем распоряжении разнообразные местные ресурсы биологического топлива. Это позволяет для каждого региона, отдаленного от традиционных мест добычи и переработки нефти, создать устойчивую топливно-энергетическую базу, практически не зависящую от привозного углеводородного топлива.

Работы по переработке (газификации) твердой непищевой биомассы и по использованию газообразных продуктов в двигателях АТС начались в России еще в двадцатые годы. При этом были достигнуты очевидные успехи, которые позволили организовать в широких масштабах выпуск транспортных газогенераторов, особенно в годы Второй мировой войны. К сожалению, в дальнейшем работы в этом направлении были неоправданно свернуты. В то же время, в мировой исследовательской практике наблюдается возрастание интереса к производству водородосодержащего топлива, получаемого из твердой непищевой биомассы. Задача стоит не только в увеличении объема производства этого вида альтернативного топлива, но и в снижении себестоимости его производства. Без применения новых химико-технологических подходов это сделать не представляется возможным.

В условиях АТС экономически оправданным и энергоемким способом бортового аккумуляирования водорода является его хранение в химически связанном состоянии в виде жидкого продукта, что обуславливает высокую безопасность при аварийных ситуациях. Традиционно в качестве источников водорода рассматривают углеводородные продукты. К носителям водорода могут быть отнесены низшие спирты (метанол, этанол), простейшие эфиры и предельные углеводороды (метан, пропан, бутан, традиционные моторные топлива). Приемлемость различных носителей водорода и способов их термохимического преобразования (конверсии) в водородосодержащий газ оценивается по нескольким параметрам с учетом их эффективности и возможности адаптации к условиям энергоустановки АТС, а именно:

- рабочая температура конверсионного процесса;
- содержание водорода в продуктах конверсии (синтез – газе);
- содержание в них двуокиси углерода;
- суммарное содержание в продуктах конверсии инертных и горючих компонентов;
- энергетические затраты на нагрев реагентов;
- энергетические затраты на организацию процесса конверсии.

Наиболее важными из перечисленных параметров являются суммарные энергетические затраты на выработку водорода и его содержание в продуктах конверсии. Значимость последнего параметра обусловлена, главным образом, высокой эффективностью реакционного воздействия водорода на кинетические и экологические показатели рабочего цикла двигателя.

Как отмечалось выше, к углеводородным соединениям – носителям водорода относятся и традиционные моторные топлива. Однако синтез водородосодержащих газов из углеводородов со столь сложной молекулярной структурой обычно связан с повышенными затратами тепловой энергии на его организацию и необходимостью обеспечения высокого температурного уровня конверсионного процесса.

Требования по условиям проведения конверсии существенно упрощаются в случае использования в качестве сырьевого продукта легких углеводородов, имеющих более простую структуру молекул. К таким углеводородным соединениям, в первую очередь, следует отнести низшие спирты (метанол, этанол), простейшие эфиры, некоторые виды предельных углеводородов и др., имеющие относительно невысокий уровень рабочей температуры диссоциации на катализаторе, что обуславливает возможность использования энергии выпускных газов (греющего теплоносителя) для организации каталитических реакций конверсии в автономном (бортовом) устройстве синтеза водорода.

Применение в качестве носителя водорода спиртов, в первую очередь метанола, считается наиболее целесообразным. Массовый показатель среды аккумуляирования водорода в

виде жидкого метанола весьма высок: в 8,5 кг метанола содержится 1 кг водорода. Тем более, из всех перечисленных выше носителей водорода метанол имеет наиболее массовое, крупнотоннажное производство, и уже относительно давно используется как заменитель нефтяных топлив, а технологические аспекты его конверсии детально отработаны в отечественной исследовательской практике. В составе метанола практически не присутствуют серосодержащие соединения, что позволяет использовать высокоэффективные катализаторы. Кроме того, при организации эндотермического процесса конверсии метанола утилизируется энергия выпускных газов, что обуславливает существенное повышение эффективности энергетической установки в целом [1, 2].

Идея создания для АТС энергетической установки в составе традиционного поршневого двигателя и системы синтеза водородного газа представляется на ближайший период достаточно перспективной для российских автотранспортных технологий. Ее практическая реализация не требует изменений базовой (серийной) конструкции двигателя серьезных технических и финансовых затрат. Важным стимулом дальнейшего развития подобной идеи является то, что она в своей основе обладает возможностями совокупного совершенствования энергетической установки АТС по комплексу показателей. Организация бортового синтеза водорода, в частности, позволяет утилизировать отходящую тепловую энергию, улучшать экологические качества установки, обеспечивая при этом частичную или полную замену традиционного нефтяного топлива альтернативным энергоносителем из возобновляемых, в том числе биологических источников.

Прогнозируемый высокий эколого-экономический эффект, реализуемый при использовании синтезированных водородосодержащих газов (синтез - газов) в транспортной энергетике, послужил стимулом для проведения поисковых исследований, осуществленных за последнее десятилетие на кафедре «Автомобильные и тракторные двигатели» Университета машиностроения. В рамках поиска наиболее эффективных технических решений изучались различные варианты возможного функционального применения этих продуктов. Во всех исследованиях были использованы продукты конверсии метанола (ПКМ), генерируемые в бортовом термokatалитическом реакторе с использованием тепловой энергии, отводимой с ОГ двигателя. Примерный компонентный состав ПКМ: 65% (об.) H_2 и 35% (об.) CO .

Применение водородосодержащих продуктов конверсии метанола в двигателях с искровым зажиганием в качестве основного топлива

Опытная апробация эффективности влияния водородосодержащего топлива (ПКМ) на топливно-экономические показатели исследуемого двигателя ВАЗ-2112 проводилась на моторном стенде путем снятия стандартных характеристик в соответствии с ГОСТ 14846-81: холостого хода, нагрузочной (при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$) и внешней скоростной характеристики.

Использование ПКМ в качестве основного топлива (вместо бензина) способствовало устойчивому росту эффективного КПД двигателя на всех исследованных режимах его работы. При этом было отмечено, что уровень повышения топливной экономичности двигателя на режиме холостого хода зависит от частоты вращения вала двигателя. При её низких значениях (от 1000 до 2500 мин^{-1}) повышение эффективности цикла (КПД) оказалось не столь существенным, вследствие недостаточной температуры ОГ для эффективного протекания процесса конверсии метанола в реакторе. Наиболее ощутимое повышение топливной экономичности (на 15,5%) наблюдалось в диапазоне частоты вращения коленчатого вала от 2800 до 3300 мин^{-1} при температуре рабочей среды в реакторе 350 – 450 °С. Это объясняется тем [1], что в рассматриваемом диапазоне частоты вращения располагаемая энергия теплоносителя (ОГ) полностью компенсировала затраты тепловой энергии на организацию эндотермического процесса конверсии.

Влияние ПКМ на экономические показатели исследуемого двигателя при его работе по нагрузочной характеристике ($n = 3000 \text{ мин}^{-1}$) проявилось в повышении эффективности цикла по сравнению с работой двигателя на бензине в среднем на 24,4 %. Для режимов, соответствующих внешней скоростной характеристике, это повышение составило в среднем 21,6%.

Следует отметить, что повышение эффективного КПД исследуемого двигателя при ра-

боте на ПКМ обусловлено совокупным влиянием двух факторов:

- эффектом термохимической регенерации (утилизации) теплоты ОГ [1];
- улучшением кинетических показателей процесса сгорания за счет реакционного влияния на этот процесс водорода [2].

Для выделения доли участия в повышении эффективности цикла каждого из названных факторов было проведено дополнительное испытание двигателя. При этом для питания двигателя из автономных баллонов в цилиндры подавался синтез-газ, компонентный состав которого соответствовал составу ПКМ. Так как синтез-газ подавался из баллонов, то в этом случае эффект регенерации тепловой энергии ОГ отсутствовал.

На режимах холостого хода повышение топливной экономичности за счет эффекта термохимической регенерации составило в среднем 4,3%, а максимально – 5,3% при частоте вращения коленчатого вала 3300 мин⁻¹. Повышение эффективности работы двигателя за счет термохимической регенерацией теплоты ОГ при работе по нагрузочной характеристике при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ соответствовало по среднему интегральному показателю 4,7%.

При последующем увеличении нагрузки доля эффекта регенерации, обуславливающая повышение эффективности цикла, снижается с 5,3 до 4,1 %, что связано с чрезмерно высоким температурно-энергетическим потенциалом ОГ, который становится выше того уровня, который необходим для компенсации эндотермического процесса конверсии метанола, поступающего в систему питания двигателя. Это «избыточное» количество тепловой энергии теплоносителя (ОГ), превышающее энергетические потребности конверсионного процесса, уже не может быть регенерировано в рабочий цикл двигателя [1]. Для режимов работы двигателя по внешней скоростной характеристике повышение уровня эффективности его рабочего цикла составило в среднем 4,2%.

Сравнительная оценка *экологических качеств* двигателя проводилась путем снятия токсических характеристик двигателя, работающего на двух видах топлива: бензине и ПКМ. При работе на бензине двигатель имел штатную систему питания. Питание ДВС водородосодержащими ПКМ осуществлялось от реактора, установленного в системе выпуска двигателя. В обоих случаях регистрация концентраций CO , CH , NO_x в ОГ проводилась при отсутствии в системе выпуска штатного каталитического нейтрализатора.

При работе двигателя на ПКМ наблюдалось снижение вредных выбросов во всем поле нагрузочной характеристики двигателя. Наиболее интенсивное снижение регистрировалось на низких и средних нагрузках, характерных для условий эксплуатации автомобиля в городе (городской ездовой цикл). Результаты стендовых испытаний нашли свое подтверждение в последующей серии исследований, которые предусматривали испытание автомобиля ВАЗ-2112, оснащенного штатной и опытной системами питания, на стенде с беговыми барабанами.

На первом этапе испытаний определяли топливную экономичность автомобиля в соответствии с ГОСТ 20306-85. Установлено, что для автомобиля с двигателем, работающим на ПКМ, путевой расход топлива (по энергетическому эквиваленту) оказался меньше на 15,1%, чем для автомобиля с бензиновым двигателем. В то же время, для автомобиля с ДВС с питанием от баллонов синтез – газом (аналогичного с ПКМ компонентным составом) топливная экономичность возросла всего на 4,8%, что связано, в данном случае, с отсутствием эффекта термохимической регенерации теплоты ОГ, а возрастание экономичности было обусловлено улучшением кинетических параметров сгорания.

На последующем этапе проведено исследование *экологических качеств* этого автомобиля по процедуре Правил 83 ЕЭК ООН. Результатами сравнительных испытаний установлено, что питания двигателя автомобиля от бортовой системы синтеза водородосодержащим топливом позволяет снизить выбросы с ОГ: CO – на 88%, CH – на 71%, NO_x – на 60% по сравнению с серийно оборудованным автомобилем, работающим на бензине.

Особо следует отметить тот факт, что при работе двигателя на водороде по данным [3] содержания NO_x в ОГ оказывается выше на 60% по сравнению с работой на бензине. Чрезмерный рост выбросов оксидов азота и тепловой напряженности деталей КС «водородного»

двигателя при его работе на стехиометрическом составе смеси ($\alpha = 1$) вынуждает прибегнуть к повышению величины коэффициента избытка воздуха α до двух единиц, что связано с потерей мощности ДВС примерно в 2 раза [3]. Подобное решение, очевидно, не приемлемо для практики. Заметим, что при переводе ДВС на питание синтезированным водородосодержащим топливом (ПКМ) одновременно снимаются все перечисленные проблемы.

Применение синтезированного водородосодержащего газа в качестве средства повышения стартовой эффективности двигателя и системы нейтрализации

Переход отечественного законодательства на новые экологические стандарты обуславливает существенное повышение требований, связанных с процедурой проведения сертификационных испытаний в условиях низких температур, что предопределяет необходимость разработки более эффективных систем нейтрализации отработавших газов (СНОГ), обеспечивающих высокую степень очистки ОГ, особенно по выбросам CO и CH за период первой, «холодной» фазы испытательного цикла. Выбросы этих компонентов в этой фазе существенно возрастают при холодном пуске автомобильного двигателя, и в ряде случаев могут достигать 60...80% от суммарного количества за все испытание. Основными причинами повышенного выброса CO и CH в этих условиях являются неэффективная работа непрогретого нейтрализатора и повышенная концентрация этих компонентов в ОГ, обусловленная характером протекания процессов смесеобразования и сгорания в условиях «холодного» ДВС.

По результатам предварительного теоретического исследования предложен альтернативный вариант решения обсуждаемой проблемы [4], который реализуется на основе стратегии использования содержащегося в ПКМ водорода, который по своим свойствам занимает особое место среди химических реагентов (активаторов). Известна способность углеводородов в присутствии водорода к окислению (сгоранию) при существенном обеднении смеси. Кроме того, водород имеет уникальную способность экзотермически окисляться на поверхности платинового катализатора даже при комнатной температуре благодаря тому, что энергия, необходимая для начала реакции окисления водорода, примерно в 10 раз ниже той, которая необходима для углеводородов. Водород, обладает высокой скоростью диффузии, что обуславливает его способность за очень короткий промежуток времени образовывать с другими компонентами горючую смесь как в цилиндре ДВС, так и при его введении в газовую среду проточного тракта СНОГ. При горении водорода толщина зоны гашения (пристеночный слой, в котором не идут окислительные процессы) примерно в 5 раз меньше, чем у углеводородных топлив. Это свойство водорода предопределяет высокую полноту сгорания топлива в двигателе, а также его эффективность воздействия как химического реагента в порах еще непрогретого каталитического блока. Перечисленные свойства водорода и легли в основу предложенной стратегии [4], которая включает в себя две взаимосвязанные стадии ее реализации.

Первая стадия связана с использованием водородосодержащих газов в качестве реакционной добавки к базовому топливу для организации рабочего процесса двигателя после его холодного пуска на обедненных смесях. При использовании этой добавки и обеднении рабочей смеси эмиссия токсических веществ непрогретого двигателя существенно уменьшается. Кроме того, в условиях режима горения бедной топливно-воздушной смеси (коэффициент избытка воздуха $\alpha > 1$) на выпуске двигателя обеспечивается концентрация в ОГ «избыточного» (остаточного) кислорода, что принципиально важно для реализации второй стадии.

Вторая стадия предусматривает использование водорода в качестве химического реагента для ускорения прогрева нейтрализатора. Продукты конверсии, содержащие свободный водород, вводятся в газовую среду проточного тракта нейтрализатора. Смесь водорода и остаточного кислорода, экзотермически окисляясь (без проявления видимого пламени) на поверхности катализатора, выделяет большое количество теплоты (низшая теплота сгорания H_2 равна 120000 кДж/кг). Выделяемая теплота одновременно «охватывает» практически весь объем сотовой структуры каталитического блока, способствуя его равномерному ускоренному прогреванию.

Кроме того, взаимодействие водорода с кислородом позволяет «извлечь» (химически

связать) свободный кислород из компонентного состава ОГ, что обуславливает необходимые условия для эффективной реализации восстановительных реакций на бифункциональном катализаторе для нейтрализации оксидов азота. Оставшийся в ОГ водород, как химически активный реагент, способствует ускоренному выходу катализатора на режим эффективного функционирования даже при относительно низких температурах в течение периода его прогрева.

Опытная апробация предложенной стратегии проводилась в два этапа: на моторном стенде, а также на стенде с беговыми барабанами. На моторном стенде исследовался двигатель автомобиля ВАЗ-2112, в системе электронного управления топливоподачей которого исходные программы были откорректированы с учетом работы ДВС на бензине и с использованием ПКМ. Для холодного пуска ДВС, программа функционировала согласно схеме штатного режима питания топливными форсунками, обеспечивающими подачу бензина в течение периода пуска двигателя и его работы до момента прогрева реактора. С этого момента в двигатель одновременно с бензином вводились водородосодержащие ПКМ, а в системе питания бензином производится автоматическая корректировка на бедный состав смеси. Расход ПКМ, поступающих в двигатель, контролировался запорным клапаном и регулировался форсункой с электромагнитным управлением. Необходимое количество ПКМ, поступающих в нейтрализатор, «отслеживалось» электромагнитным клапаном. Параметры работы реактора по расходным характеристикам были функционально согласованы с энергетическими параметрами теплоносителя (ОГ двигателя) [1, 4].

Спустя 8 секунд после выхода ДВС на режим холостого хода и прогрева реактора во впускной тракт двигателя через электромагнитную форсунку вводились ПКМ, а топливно-воздушная смесь обеднялась, и ее состав поддерживался на уровне, соответствующем $\alpha = 1,25$.

В начальный период после пуска двигателя прослеживалось характерное для всех ДВС интенсивное возрастание содержания в ОГ несгоревших CH , CO . С момента поступления в цилиндры водородосодержащей добавки происходило столь же быстрое снижение концентрации этих продуктов. Регистрировалось снижение массовых выбросов с ОГ CH и CO до 75 и 55% соответственно.

На заключительном этапе опытной апробации проведены испытания автомобиля ВАЗ-2112 на стенде с беговыми барабанами по методике испытательного цикла NEDC (NewEuro-eanDrivingCycle) правил 83 ЕЭК ООН. Автомобиль ВАЗ-2112 с серийной СНОГ (ЕВРО-3), оснащенный бортовой системой синтеза водородосодержащего газа с целью реализации предложенной стратегии. Подача этого газа в ДВС и нейтрализатор проводилась в течение 20 с. Последующая работа двигателя (с уже прогретым ДВС и эффективно работающим нейтрализатором) осуществлялась в штатном режиме с отключенной системой синтеза.

Установлено, что за период «холодной» фазы (195 секунд) испытательного цикла выбросы автомобилем CH снижаются на 45%, CO - на 40% по сравнению с его серийным аналогом. При этом только 0,2 МДж химической энергии водорода использовалось при испытании. За весь испытательный цикл NEDC выбросы CH и CO составили 0,08 г/км и 0,85 г/км соответственно, а выбросы NO_x - 0,076 г/км. По сравнению с серийным аналогом выбросы этих компонентов снижены на 33, 36 и 12% соответственно. Полученные показатели соответствуют (даже с некоторым запасом) нормативным требованиям Правил 83-05 ЕЭК ООН.

По результатам опытной апробации можно заключить, что реализация данной стратегии обуславливает ряд преимуществ при переходе российского транспортного комплекса на перспективные экологические нормы. В этом случае могут быть использованы существующие системы нейтрализации, что исключает необходимость капиталовложений в создание дорогих систем нового поколения; в силу высокой эффективности предложенной стратегии при ее внедрении создаются предпосылки для экономии драгметаллов платиновой группы и снижения себестоимости нейтрализаторов.

Применение синтезированных водородосодержащих продуктов в бензиновых двигателях с внутренним смесеобразованием

Высокий уровень топливно-экономических показателей бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием бензина (НВБ) стимулирует повсеместное стремление исследователей к их развитию и дальнейшему совершенствованию. 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. Наряду с финансовыми проблемами, перспективы производства и внедрения ДВС с НВБ на отечественном автомобильном транспорте связаны также с решением целого ряда серьезных технических и технологических проблем.

Как известно, на режимах частичных нагрузок (характерных для условий городской езды) двигатели с НВБ переводятся на работу с послойной организацией смесеобразования при существенном обеднении рабочей смеси ($\alpha \gg 1$). Понятно, что работа ДВС на подобных смесях сопровождается выбросом в атмосферу оксидов азота вследствие потери восстановительной способности (очистки ОГ от NO_x) традиционного бифункционального нейтрализатора. Для снижения выбросов NO_x серийных зарубежных ДВС с НВБ до уровня нормативных требований их изготовители вынуждены использовать дополнительную систему «вторичной» очистки накопительного типа, содержащую сорбционный аппарат (названный как нейтрализатор - NO_x) и сложную схему управления. Подобный сорбционный нейтрализатор 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 650°C. 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 и его дезактивации.

Проведение постоянно чередующегося высокотемпературного процесса регенерации нейтрализатора сорбционного типа обуславливает необходимость резкого повышения температуры ОГ 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» (потере эффективности) каталитического блока.

Нейтрализаторы накопительного типа значительно дороже традиционных трехкомпонентных нейтрализаторов и требуют более частой замены. При отсутствии необходимых материалов и собственного производства этих нейтрализаторов с учетом их высокой стоимости и низкой надежности применение подобных систем на отечественном автомобильном транспорте малоперспективно. Рассмотренные проблемные вопросы, связанные с разработкой перспективных отечественных двигателей с НВБ, стимулируют необходимость поиска средств и новых технических решений, приемлемых для отечественного двигателестроения.

В рамках поисковых исследований на кафедре АТД разработан метод [2,5], основанный на использовании ПКМ, добавляемых к рабочему заряду двигателя в качестве химического активатора, и позволяющий отказаться от дорогого и ненадежного сорбционного нейтрализатора - NO_x при сохранении исходных экологических качеств ДВС с НВБ. Апробация метода по методике New European Driving Cycle Правил 83-05 ЕЭК ООН применительно к автомобилю с экспериментальным двигателем с НВБ показала, что этот автомобиль удовлетворяет требованиям перспективных норм отечественного экологического законодательства в отсутствие нейтрализатора - NO_x [5].

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

Применение синтезированных водородосодержащих газов в транспортных дизелях

Согласно предложенному [6] алгоритму функционирования энергетической установки в составе дизеля и бортовой системы синтеза водородосодержащего газа, этот газ в качестве компонента смесевое топлива поступает в рабочее пространство дизеля через впускной трубопровод вместе с воздушным зарядом, где он воспламеняется и сгорает при впрыскивании в цилиндр дизельного топлива.

Опытная апробация данного способ организации рабочего процесса осуществлена применительно к условиям работы дизеля типа 4Ч 10,5/12. Было достигнуто следующее улучшение эколого-экономических показателей исследуемого дизеля: снижение дымности ОГ на 45%, выбросов оксидов азота - на 16% при повышении эффективности цикла на 8,5% [6].

Применение водородосодержащего газа в дизелях, работающих на биодизельном смесевом топливе

Одним из решений проблем повышения экологической и топливно-энергетической безопасности в сфере эксплуатации мобильной дизельной техники является использование биологических добавок к базовому углеводородному топливу. Однако для окончательного решения проблемы, в целом потребуются разработка дополнительных мер, в частности, для снижения эмиссии оксидов азота, что является характерной проблемной задачей, связанной с применением для дизелей практически любого вида биологического топлива. Для решения подобной задачи на кафедре АТД разработан метод [7], который реализуется с использованием синтезированного водородосодержащего газа (ПКМ).

Метод базируется на двух основных положениях, которые в общем виде могут быть сформулированы следующим образом.

1. Добавка биологического компонента к базовому топливу является эффективным средством улучшения экологических качеств дизеля. Достижение предельно возможного улучшения этих качеств возможно при условии оптимального добавления биологического компонента к базовому топливу с учетом конкретного способа организации рабочего процесса дизеля.
2. Одной из сопутствующих проблемных задач, возникающей при использовании биологических добавок к дизельному топливу, является повышение эмиссии оксидов азота (в ряде случаев и снижение эффективности рабочего цикла), без успешного решения которой целесообразность использования биологических топлив для дизельных АТС представляется проблематичной. С целью снижения эмиссии с ОГ оксидов азота в состав рабочего тела дизеля дополнительно вводится строго дозированная порция водородосодержащих ПКМ в качестве химического активатора. Благодаря применению этого активатора дополнительно прогнозируется также повышение эффективности рабочего цикла.

Таким образом, концепция предлагаемого метода отображает скоординированное и совокупное воздействие на процессы рабочего цикла дизеля одновременно двух факторов, один из которых привнесен оптимизированной биологической добавкой к базовому топливу, а другой – применением строго дозированной присадки к горючей смеси водородосодержащего газа. В данном случае этот газ выполняет функции активирующего средства, которое дополняет уровень повышения экологические качества дизеля, привносимого применением добавки биологического продукта, обеспечивая при этом возможность решения характерных проблемных задач, возникающих при этом.

Для опытной апробации предложенного метода проведены испытания на моторном стенде с дизелем типа 4Ч 10,5/12. Программа испытаний строилась в русле стандартного регламента 8-режимного испытательного цикла, Правил ЕЭК ООН № 96 для дизелей транспортных средств категории «Т». В качестве биологического продукта использовался метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ).

Установлено, что средне интегральные за испытательный цикл удельные выбросы нормируемых компонентов ОГ (CO , CH) и дымность ОГ для исследуемого дизеля при его переводе на работу на бинарном топливе с оптимизированным компонентным составом (60% дизельного топлива + 40% МЭРМ) были снижены. Однако при этом выбросы оксидов азота,

как и ожидалось, возростали по отношению к исходному варианту (работа на дизельном топливе).

При работе дизеля на том же бинарном топливе с присадкой водородосодержащего газа к рабочему телу средне интегральные за цикл удельные массовые выбросы оксида углерода уменьшились на 11,2%, углеводородов на 32,8% при снижении дымности ОГ на 48%.

При этом выбросы NO_x оказались ниже уровня выбросов этого компонента ОГ не только для дизеля, работающего на смесевом биоуглеводородном топливе, но и для исходного варианта (на 11,9%).

Средне интегральный за испытательный цикл удельный эффективный расход топлива увеличился на 1,3% вследствие более низкой теплоты сгорания бинарного топлива по сравнению с углеводородным (дизельным) топливом. Однако эффективность использования энергии этого топлива возросла, о чем свидетельствует повышение результирующего за испытательный цикл эффективного КПД на 3,5%.

С учетом данных опытной апробации можно заключить, что использование биоуглеводородных топливных композиций способствует совершенствованию экологических качеств транспортных дизелей, а также энергообеспечению транспорта альтернативными видами топлива из возобновляемых сырьевых источников. Несмотря на указанные преимущества, при использовании бинарных топлив возникают характерные проблемные задачи, сдерживающие их широкое применение на транспорте. Предложенный метод обуславливает возможность решения этих задач и реальную перспективу внедрения этого вида топлива в сферу транспортного энергопотребления.

Заключение

По приведенным в статье результатам исследований можно сделать следующее заключение. Накопленный к настоящему времени опыт по изучению эксплуатационных свойств и практическому применению синтезируемых в бортовых системах водородосодержащих газов обуславливает реальную возможность их использования в энергетических установках АТС. Увеличение доли их применения в сфере транспортного энергобаланса способно существенно повлиять на снижение потребления традиционных нефтяных топлив, обуславливает возможность комплексного подхода к решению актуальных проблем современного автотранспортного комплекса: повышение экологической и энергетической безопасности.

Несмотря на существующие финансовые и технологические трудности отрасли, накопленный научно-технический потенциал в отечественной исследовательской практике, основанный на успехах конкретных технических решений, в том числе и обсужденных в данной статье, убедительно свидетельствует, что существует потенциальная возможность обеспечения в ближайшие годы реального вхождения отдельных видов водородных энергоресурсов в среду отечественной транспортной энергетики.

Практическое внедрение водородных технологий на транспорте позволит приблизить сроки более широкого освоения водородной энергетики в России.

Литература

1. Fomin V.M., 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. 834-840.
2. Фомин В.М., Платунов А.С. Водород как химический реагент для совершенствования показателей работы автомобильного двигателя с НВБ // Транспорт на альтернативном топливе. № 4 (22). 2011. – С. 30-37.
3. Гальшев Ю.В. Анализ перспектив создания водородных двигателей // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAE. № 2 (22). 2005. – С. 19-23.
4. Фомин В.М., Каменев В.Ф., Хрипач Н.А. Стратегия стартового прогрева автомобильной системы нейтрализации на основе использования водородного реагента // Труды НАМИ. – Вып. № 242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств: М., 2009. –

С. 105 – 132.

5. Фомин В.М., Платунов А.С. Метод совершенствования показателей работы бензинового двигателя с внутренним смесеобразованием // М.: Известия МГТУ «МАМИ». – № 2 (12) 2011. – С. 84-95.
6. Фомин В.М., Каменев В.Ф., Хрипач Н.А. Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на водородно-дизельных топливных композициях // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEE. № 7. 2005. – С. 32-42.
7. Фомин В.М., Атраш Рами. Улучшение показателей работы дизеля на бинарном биоуглеводородном топливе // Транспорт на альтернативном топливе. № 5 (29). 2012. – С. 36-40.

Метод статистической линейаризации в динамике нелинейных систем мобильных машин

д.т.н. проф. Гусев А.С., к.т.н. проф. Щербаков В.И., доц. Чуканин Ю.П.,
к.т.н. доц. Стародубцева С.А.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Университет машиностроения,
8(499)-223-05-23, доб. 14-57; sopr@mami.ru

Аннотация. Рассматривается метод статистической линейаризации применительно к нелинейным динамическим системам мобильных машин с несколькими степенями свободы.

Ключевые слова: случайный процесс, нелинейная динамическая система, статистическая линейаризация, корреляционная функция, спектральная плотность, дисперсия.

Методы расчета линейных динамических систем мобильных машин на случайные воздействия к настоящему времени хорошо разработаны [1, 2, 3]. При аналитическом расчете же нелинейных систем часто возникают почти непреодолимые вычислительные трудности. Наиболее эффективным (приближенным) методом расчета таких систем является метод статистической линейаризации [2]. Рассмотрим использование этого метода для расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы, функционирование которых описывается следующим матричным дифференциальным уравнением вида:

$$L(p) \cdot \vec{q}(t) + \vec{\varphi}(q) = \vec{f}(t) \quad (1)$$

где: $L(p)$ – матрица линейных дифференциальных операторов ($p = d / dt$);

$\vec{q}(t) = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ – вектор обобщенных координат;

n – число степеней свободы системы;

$\vec{\varphi}(\vec{q})$ – нелинейная вектор-функция сил сопротивления;

$\vec{f}(t)$ – вектор гауссовских стационарных процессов внешних воздействий с нулевыми средними значениями и заданными спектральными плотностями в виде матрицы:

$$S_{\vec{f}}(\omega) = [S_{f_\alpha f_\beta}(\omega)], \quad (\alpha, \beta = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

Задача состоит в определении матрицы спектральных плотностей выходных процессов $\vec{q}(t)$

$$S_{\vec{q}}(\omega) = [S_{q_k q_j}(\omega)], \quad (k, j = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

Применим к уравнению (1) метод статистической линейаризации, суть которого состоит в замене нелинейной функции $\vec{\varphi}(\vec{q})$ на линейную $\vec{\varphi}_0(\vec{q}) = C \cdot \vec{q}$, где матрица коэффициентов линейаризации $C = [c_{kj}]$ подлежит определению по какому-либо критерию, определяющему близость векторов $\vec{\varphi}$ и $\vec{\varphi}_0$.

Получаем линейаризованное уравнение вида:

$$[L(p) + C] \cdot \vec{q}(t) = \vec{f}(t). \quad (4)$$