

Автомобильная промышленность №3, 2005.

3. Соколов В.К., Строков П.И., Голубев Д.С. Практическое применение электрогидродинамического насоса. Тракторы и сельхозмашины №3, 2009.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде (гидродинамическое описание). – М.: Наука, 1971, 155 с.
5. Лепешкин А.В., Михайлин А.А. Гидравлические и пневматические системы. Под ред. Беленкова Ю.А. Учебник. 6-ое издание. – М.: изд. «Академия», 2011. 336 с.
6. Максимов Ю.В., Соколов В.К., Бекаев А.А., Строков П.И. Топливный насос нового поколения // Изв. МГТУ "МАМИ". 2012. № 2(14). Т. 2. С. 241-245.

УДК 629.434-622

**Перспективы и направления развития научной школы на кафедре
«Автомобильные и тракторные двигатели» Университета
машиностроения (МАМИ)**

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

Аннотация. Анализируются результаты научно-поисковых работ, проводимых на кафедре АТД МГМУ (МАМИ) в области транспортной альтернативной энергетики. Обосновывается потенциальная возможность реального вхождения в ближайшие годы отдельных видов водородных и биологических энергоресурсов в структуру национальной транспортной энергетики. Рассматриваются перспективы развития исследований.

Ключевые слова: альтернативные энергоносители, синтезированный газ, аккумулялирование водорода, биомасса, катализатор, метанол, конверсия.

На протяжении двух последних десятилетий на кафедре «Автомобильные и тракторные двигатели» Университете машиностроения (МАМИ) в рамках целевой программы проводится комплекс поисковых исследований в области альтернативной энергетики, по двум направлениям: водородная энергетика и биоэнергетика. Отдельные этапы программы реализовывались при финансовой поддержке РФФИ.

Программа поисковых исследований по направлению – водородная энергетика

Водороду среди альтернативных топлив для автомобильных двигателей в мировой исследовательской практике отводится особое место. Учитывая огромные ресурсы водорода в природе и возможность его получения из возобновляемых сырьевых источников, например, растительных, немаловажную роль играет то, что при использовании его в качестве топлива на транспортных средствах создаются возможности практической неисчерпаемости данного энергоносителя. Водород обладает чрезвычайно высокой массовой энергоемкостью (почти в 3 раза большей, чем у традиционных нефтяных топлив), уникальными кинетическими и экологическими характеристиками сгорания.

Увеличение доли водородной энергетики в общем балансе отечественного транспортного энергообеспечения способно существенно повлиять на структуру потребления энергетических источников на органической основе, а также на результирующие показатели по повышению энергетической и экологической безопасности на транспорте. Однако, массовое энергетическое использование водорода на российском транспорте в настоящее время сдерживается рядом сложных, еще не решенных проблем: отсутствие инфраструктуры его производства и распределения, высокая стоимость. Вопросы национального развития крупномасштабного энергетического использования водорода на транспорте требуют дальнейшего си-

стемного анализа с учетом текущего состояния энергетической и технологической структуры в стране.

Тем не менее, накопленный в исследовательской практике кафедры АТД научно-технический потенциал, основанный на успехах конкретных технических решений, убедительно свидетельствует, что существует потенциальная возможность обеспечения уже в ближайшие годы реальное вхождение отдельных видов водородных энергоресурсов в транспортный энергобаланс страны. Одним из таких решений является реализация концепции бортового аккумулирования (хранения) водорода в химически связанном состоянии в виде жидкого продукта, что существенно минимизирует затраты в сфере энергообеспечения и в инфраструктуре распределения водорода, радикально решает проблему эксплуатационной безопасности. Водород в виде компонента водородосодержащего газа в количестве, необходимом для работы двигателя, может производиться путем термохимического преобразования (конвертирования) жидкого носителя водорода в бортовом каталитическом конвертере.

К таким потенциальным носителям водорода в первую очередь следует отнести низшие спирты (метанол, этанол). Спиртовые соединения могут быть подвержены термокаталитическому преобразованию (каталитической конверсии) в водородосодержащий газ при относительно невысокой температуре, что обуславливает возможность использования в качестве греющего теплоносителя «бесплатной» низко потенциальной тепловой энергии выпускных газов двигателя.

На сегодняшний день по результатам серии работ, проведенных в рамках совместных программ в МАМИ, НАМИ и Институте катализа (РАН), детально отработана и отлажена технология выработки водородосодержащего газа из метанола [1, 2] непосредственно на борту транспортного средства. Из всех известных носителей водорода метанол имеет наиболее массовое, крупнотоннажное производство в России, и уже относительно давно используется как заменитель нефтяных топлив в мировой практике. Целесообразность использования метанола 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).

Предварительно следует отметить один важный фактор, сопутствующий применению в ДВС системы конверсии метанола, – *энергосберегающий эффект*, который был выявлен в ходе реализации научно-исследовательской программы.

В двигателях внутреннего сгорания доля потери энергии топлива с ОГ составляет 30...55%, что соответствует 12000...23000 кДж на каждый килограмм израсходованного топлива. Процесс предварительного термохимического преобразования метанола в реакторе, установленном в выпускной системе ДВС, обуславливает дополнительную возможность частичной утилизации (регенерации) этой безвозвратно теряемой энергии.

Сущность регенерации заключается в том, что процесс предварительного химического преобразования метанола сопровождается поглощением теплоты (на организацию эндотермических реакций конверсии), которая отбирается от выпускных газов двигателя в термохимическом реакторе, выполняющем в данном случае функции утилизационного устройства («термохимического насоса»). Регенерированная часть отходящей теплоты, преобразованная на более высоком энергетическом уровне в химическую энергию конвертированного топлива (водородосодержащий газ), идет на повышение эффективности рабочего цикла двигателя. Для сравнения: теплота сгорания метанола (исходного продукта) равна 19,6 МДж/кг; этот же показатель для водородосодержащих продуктов его конверсии соответствует 23,8 МДж/кг.

В ходе совершенствования конструкции реакторов разработан оригинальный (патент РФ № 2249807) образец аппарата, который позволяет утилизировать нереализованную в ДВС химическую энергию топлива (продуктов неполного сгорания). Это достигалось за счет организации экзотермического (с выделением теплоты) процесса каталитического доокисления ОГ в специальной секции реактора. В этом случае удается использовать не только тепловую (физическую) компоненту энергии ОГ, но и их химическую составляющую для повышения

уровня регенерации рабочего цикла двигателя и эффективности конверсионного процесса.

Данными математического моделирования, подтвержденными результатами экспериментальных исследований, установлено, что при применении опытной системы практически более 15% (теоретически в пределе до 21,4%) энергии ОГ может быть регенерировано, и возвращено в виде химической энергии конвертированных продуктов (водородосодержащего газа) в рабочее пространство двигателя для участия в более эффективной организации его рабочего цикла.

Проявление данного энергосберегающего эффекта при использовании опытной системы бортового синтеза водородосодержащего топлива существенно расширяет потенциальные возможности применения этой системы на транспортных средствах. Ее реализация позволяет комплексно решать проблемы повышения топливной экономичности и снижения токсичных выбросов.

Прогнозируемый высокий эколого-экономический эффект, реализуемый при использовании синтезированных водородосодержащих газов (синтез газов), послужил стимулом для проведения поисковых исследований с привлечением опытной апробации, осуществленных на кафедре АТД. С целью поиска наиболее эффективных технических решений изучались различные функциональные варианты возможного применения этих газов. Во всех исследованиях, рассмотренных ниже, были использованы водородосодержащие 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 [1, 2].

По результатам исследований выявлен уровень эффективности использования водородосодержащих ПКМ для ряда энергетических установок различного типа и назначения.

Для дизелей транспортно-технологических машин. Согласно предложенному алгоритму функционирования опытной энергетической установки в составе дизеля и системы термохимического преобразования метанола, генерируемый водородосодержащий газ в качестве компонента смесевого топлива поступал в рабочее пространство дизеля через впускной трубопровод вместе с воздушным зарядом, где он воспламенялся и сгорал при впрыскивании в цилиндр «запальной» порции дизельного топлива.

При этом на номинальном режиме было достигнуто следующее улучшение экологических и топливно-экономических показателей объекта исследования - тракторного дизеля типа 4Ч 10,5/12: снижение дымности ОГ на 45%, выбросов оксидов азота – на 16% при уменьшении удельного эффективного расхода топлива на 8,5%.

Для ДВС с искровым зажиганием автотранспортных средств. Реализация опытной системы при использовании в качестве основного топлива ПКМ обеспечивает в условиях ездового цикла ГОСТ 20306-85 автомобилю ВАЗ-2112 повышение топливной экономичности на 15,1% по сравнению с бензиновым аналогом. Данное повышение экономичности совокупно обусловлено более высокими кинетическими показателями сгорания водородосодержащего топлива (совершенствованием рабочего процесса) и эффектом термохимической регенерации энергии ОГ. Анализ результатов исследования показал, что доля повышения экономичности за счёт эффекта термохимической регенерации энергии ОГ составляет 4,8%.

Результаты математического моделирования показывают, что более значительные преимущества двигателя, работающего на водородосодержащем синтезированном топливе, по сравнению с бензиновым аналогом могут быть получены при работе на частичных нагрузках, так как широкие пределы воспламеняемости топливно-воздушных смесей, содержащих водород, позволяют применить *качественное регулирование* мощности. При этом двигатель обеспечивает стабильную работу на существенно обедненных смесях ($\alpha = 1,5...2,0$) с высоким КПД.

Результатами испытаний этого же автомобиля по методике ездового цикла Правил № 83 ЕЭК ООН установлено следующее улучшение его экологических качеств: выбросы CO снизились на 95 %, CH – на 98 %, NO_x – на 68 %.

Общеизвестный опыт исследовательской практики показывает, что при работе двигате-

ля на «чистом» *водороде* в качестве основного топлива с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1$ эмиссия NO_x весьма значительна, и существенно превышает уровень эмиссии бензинового аналога. Чрезмерный рост выбросов оксидов азота и тепловой напряженности водородного двигателя при его работе на стехиометрическом составе смеси вынуждает прибегнуть к повышению величины коэффициента избытка воздуха α до двух единиц, что автоматически связано с потерей мощности ДВС примерно в 2 раза. Подобное решение, очевидно, не приемлемо для практики.

В нашем же случае при использовании в качестве основного моторного топлива не водорода, а ПКМ с массовым содержанием водорода 12,5% подобной проблемы не существует, так же как и проблемы «обратных всплесков» водорода во впускном тракте двигателя.

Результаты проведенных исследований убедительно свидетельствуют, что концепция создания энергетической установки автомобиля в составе поршневого двигателя и бортовой системы синтеза водородосодержащего топлива представляется, априори, весьма перспективной на ближайший период развития российского тракторо- и автомобилестроения.

Важным стимулом дальнейшего развития подобных энергетических установок является то, что они обладают возможностями совокупного совершенствования своих характеристик по комплексу показателей. Их реализация на транспортных средствах, в частности, позволяет утилизировать отходящую тепловую энергию, совершенствовать процессы сгорания в двигателе, улучшать экологические качества ТС, обеспечивая при этом возможность замены традиционного нефтяного топлива альтернативным энергоносителем из возобновляемых, в том числе, биологических источников.

Альянс системы синтеза водородного газа и ГСУ. Бортовая система синтеза водородосодержащего топлива может быть успешно использована на автомобилях с гибридной силовой установкой (ГСУ), дополняя и совершенствуя ее положительные эксплуатационные качества. Опытный образец традиционной ГСУ уже разработан на кафедре «Автомобили и тракторы» МГМУ (МАМИ). С учётом уже накопленного опыта двух кафедр, на ближайшее будущее представляется возможным разработка макетного образца высокоэффективной ГСУ, оснащённой реактором конверсии метанола, в рамках совместного научно-технического сотрудничества кафедр.

В варианте совместного использования на АТС системы синтеза водородосодержащего топлива и ГСУ с буферным накопителем энергии обеспечиваются благоприятные (стабильные) условия для организации максимально эффективной работы реактора, которая в меньшей степени в данном случае будет зависеть от характера изменения режима движения транспортного средства. Подобные условия предопределяются возможностью реализации квазистационарного режима работы ДВС в составе ГСУ, когда мощность двигателя плавно изменяется в узком диапазоне. При этом характеристики системы синтеза водорода и буферного накопителя энергии могут быть рационально скоординированы (совмещены) по программе штатного электронного блока управления с учетом текущих энергетических потребностей автомобиля.

Совокупность положительных свойств ГСУ и бортовой системы синтеза водородосодержащего топлива обуславливает потенциальную возможность создания энергетической установки для отечественного автомобиля с высоким уровнем усовершенствования по экономическим и экологическим показателям.

Программа поисковых исследований по направлению – биоэнергетика

Ограниченность природных источников органического топлива и возрастающая проблема экологической безопасности на транспорте являются началом наблюдаемого во всем мире нового периода в области развития транспортной энергетике, наиболее характерными чертами которого является многократно возрастающая роль биоэнергетики, основными преимуществами которой являются ее неисчерпаемость и экологическая чистота, что принципиально отличает ее от традиционной энергетике. При этом развитие биоэнергетики повсеместно считается наиболее перспективным путём решения проблем энергообеспечения, как в сфере постоянно растущего энергопотребления в целом, так и в направлении перспективного

развития транспортной энергетики. Энергетический потенциал ежегодно произрастающей биомассы в два раза превышает суммарную энергию годового потребления всех видов углеводородного сырья. Современные технологии производства биотоплив позволяют потенциально удовлетворить все энергетические потребности, используя лишь 2% площади поверхности планеты.

Основной причиной, сдерживающей широкое применение биотоплив в транспортных двигателях, являются несоответствие их физико-химических свойств требованиям эффективной организации рабочего процесса. В этих условиях становится очевидной необходимость в принятии специальных мер, которые позволили бы в наибольшей степени приблизить моторные свойства биологических топлив к стандартным свойствам моторного топлива.

В качестве одной из таких мер является использование двухкомпонентных топливных композиций в виде смеси органического и биологического топлив. При варьировании компонентным составом такого топлива возможно достижение наиболее приемлемых его физико-химических свойств. При проведении исследований на кафедре АТД, учитывая сложный характер влияния доли биологического компонента в составе смесевом топливе на экологические и эффективные показатели двигателя, задача выбора состава смесевоего топлива ставилась как оптимизационная. Исследование по поиску оптимального компонентного состава смесевоего топлива проводилось на основе математического моделирования.

По результатам анализа установлено, что при использовании биологических добавок к углеводородному топливу обнаруживается ещё одна проблема, связанная с повышением эмиссии оксидов азота (NO_x). В качестве меры, которая позволила бы в наибольшей степени решить эту проблему, было предложено использование водородосодержащих ПКМ в качестве анти токсичной активирующей присадки.

С учётом предложенных мер предполагалось, что удачно скоординированное воздействие на процессы рабочего цикла двигателя одновременно двух физико-химических факторов, один из которых привнесён оптимизацией компонентного состава смесевоего топлива, а другой – применением химического реагента, предопределяет возможность совокупного (комплексного) подхода к решению проблемы эффективного использования биотоплив в двигателях.

Эффективность и характер воздействия подобного комплексного подхода на процессы окисления (сгорания) бинарных биоуглеводородных топлив до настоящего времени остаются ещё малоисследованными, что обусловило необходимость в разработке новой концепции для его реализации.

Разработанная на кафедре АТД концепция комплексного подхода в своей основе базируется на трех основных положениях, которые в общем виде могут быть сформулированы следующим образом.

1. Учитывая, что проблема создания высокоэффективного рабочего цикла дизеля при переводе его на питание биологическим топливом сопряжена с необходимостью реализации целого ряда технических решений, требует внесения серьезных изменений базовой конструкции ДВС и его топливной аппаратуры, предлагается частичная замена дизельного топлива на биологический компонент. При применении бинарного топлива (при сохранении базовой комплектации двигателя) частично решаются задачи, связанные с отличием физико-химических свойств биологического топлива от традиционного нефтяного.
2. Учитывая сложный (в ряде случаев неоднозначный) характер влияния доли биологического компонента в составе бинарного топливе на экологические и топливно-экономические показатели двигателя, выбор рационального компонентного состава смесевоего топлива осуществляется на основе обобщенного критерия оптимальности, который позволяет интегрально оценить оптимальную величину этой доли. При этом прогнозируется достижение предельно возможного улучшения указанных показателей двигателя.
3. Одной из ключевых сопутствующих проблем, возникающей при использовании биологических добавок к углеводородному топливу, является проблема повышения эмиссии ок-

сидов азота, без успешного решения которой разработка конкурентоспособного двигателя остается проблематичной. С целью снижения эмиссии с ОГ токсичных веществ, в первую очередь, оксидов азота, в состав свежего заряда двигателя вводится строго дозированная порция химически активного реагента (водородосодержащего газа). Благодаря применению реагента дополнительно прогнозируется также повышение эффективности использования энергии смесового топлива.

Опытная апробация предложенной концепции проводилась на тракторном дизеле типа 4Ч 10,5/12 с использованием смеси дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла (МЭРМ). Логика испытаний строилась в русле стандартного регламента 8-режимного испытательного цикла Правил ЕЭК ООН № 96 для тракторных дизелей.

Установлено [3], что средне интегральные за испытательный цикл удельные массовые выбросы нормируемых компонентов ОГ (CO , CH и дисперсных частиц) при работе дизеля на бинарном топливе с оптимизированным компонентным составом (60%ДТ+40%МЭРМ) были снижены. Однако при этом выбросы оксидов азота, как и ожидалось, возросли по отношению к исходному варианту (работа на дизельном топливе).

При работе дизеля на том же топливе с присадкой водородосодержащего реагента к рабочему телу средне интегральные за цикл удельные массовые выбросы по сравнению с исходным вариантом уменьшились. Регистрировалось снижение выбросов для монооксида углерода на 11,2%, для углеводородов на 32,8%, для дисперсных частиц на 48%. При этом выбросы NO_x оказались ниже уровня выбросов этого компонента ОГ не только для дизеля, работающего на смесовом биоуглеводородном топливе, но и для его исходного варианта (на 11,9%).

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

С учетом данных проведенного исследования можно утверждать, что стратегия подобного комплексного подхода не только решает известные проблемные вопросы биодизеля, но и позволяет его преобразовывать в конкурентоспособную энергетическую установку с более высокими эколого-экономическими показателями по сравнению с дизелями, работающими с традиционными способами организации рабочего процесса (на дизельном топливе).

В заключение следует заметить, что проблема использования биологических продуктов в качестве основного топлива на отечественном транспорте на данном этапе обуславливает необходимость решения ряда серьезных задач. С учетом существенного отличия физико-химических свойств данного вида топлива от традиционных топлив необходимо проведение большого объема исследовательских работ, связанных с поиском рациональной организации процессов смесеобразования и сгорания с последующей разработкой двигателей на основе принципиально новых способов организации рабочего процесса. К проблеме широкого внедрения биологических источников энергии на транспорте следует дополнительно отнести необходимость существенных финансовых затрат, связанных с переоборудованием существующей технологической базы, ориентированной на выпуск новых видов двигателей, адаптированных к работе на данном топливе.

Поэтому широкомасштабное использование биологических продуктов в качестве основного моторного топлива в транспортно-технологическом комплексе России на ближайший период достаточно проблематично. Более предпочтительным представляется использование биологических топлив в виде топливных композиций с принятием соответствующих мер, в частности предложенных на кафедре АТД, для достижения наиболее приемлемых физико-химических свойств, отвечающим требованиям эффективной организации рабочего процесса двигателя.

В настоящее время на кафедре АТД в рамках программы поисковых исследований по направлению – биоэнергетика проводятся работы, в том числе, и контрактные, связанные с

применением биологических топлив в бензиновых двигателях с искровым зажиганием. Предварительные результаты исследований подготавливаются к опубликованию в последующих сборниках «Известия МГТУ «МАМИ»».

Литература

1. Фомин В.М., Апельинский Д.В., Каменев В.Ф. Генерирование водородосодержащего газа на борту транспортного средства // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. № 1 (15). – Т.1. – С. 204-212.
2. Фомин В.М. Эффективное применение водородных энергоресурсов в структуре энергообеспечения АПК// Тракторы и сельхозмашины. – 2014. №6. – С. 3-7.
3. Фомин В.М., Рами Атраш. Совершенствование показателей работы тракторного дизеля на смесевом биодизельном топливе// Тракторы и сельхозмашины. - 2013. № 5. – С. 5-10.

УДК 629.003.13

Идентификация продольного движения автомобиля в режиме выбега

д.т.н. проф. Катанаев Н.Т., к.т.н. проф. Лепешкин А.В., Колбасов А.Ф.

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

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования прямолинейного движения автомобиля и приведен обзор ряда существующих моделей. Анализ проводился с целью получения аналитической информации о балансе эффективных сил и сил сопротивления движению объекта в режиме свободного выбега. Получение достоверного математического описания необходимо при разработке модели человеко-машинной системы «автомобиль-среда-водитель», а также при исследовании влияния различных факторов на эксплуатационные характеристики объекта управления.

Ключевые слова: автомобиль, эксперимент, идентификация, продольное движение, силы сопротивления, методы моделирования, адекватность моделей.

Модели различного рода движущихся объектов являются одними из самых эффективных и распространенных видов инструментов совершенствования систем управления и динамических характеристик при решении задач взаимной адаптации систем «человек-машина», массовым представителем которой является система «автомобиль-среда-водитель» [2]. Разработка математического описания объекта управления такой системы включает постановку целого ряда как лабораторных, так и полевых экспериментальных исследований.

Такие параметры автомобиля как масса, линейные размеры, коэффициент сцепления колес с дорогой и многие другие, как правило, определяются по известным методикам. Однако некоторые из параметров и характеристик определяются достаточно сложным путем в силу влияния большого числа различного рода факторов. Например, силы сопротивления движению автомобиля включают постоянную составляющую, не зависящую от скорости движения; составляющую, связанную со скоростью движения и аэродинамическую составляющую, зависящую от квадрата скорости движения автомобиля. Безусловно, перечень других факторов достаточно широк (ветер, наклон дороги, температура, гололед и т.д.) и их влияние, как правило, в процессе испытаний стараются свести до минимума.

В ряде случаев для определения только аэродинамической составляющей проводятся дорогостоящие и затратные по времени эксперименты с использованием аэродинамической трубы. Теоретические основы аэродинамики автомобиля, как в отечественной практике, так