

## ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

### **Биоэнергетика транспорта**

к.т.н. доц. Апелинский Д.В.  
Университет машиностроения,  
(495) 223-05-23, доб. 1019, atd\_tami@mail.ru

*Аннотация.* Обсуждается проблема поиска альтернативных путей энергетического обеспечения транспортного комплекса. Обосновывается эколого-экономическая целесообразность перевода энергетических установок транспортных средств на питание топливом, произведенным из биомассы. Приведены результаты экспериментальных исследований способов рационального использования некоторых биологических энергоносителей в качестве частичных заменителей нефтяного топлива.

*Ключевые слова:* альтернативные энергоносители, биологический вид топлива, альтернативная транспортная энергетика, топливо из твердой биомассы, газификация, топливо из масличных культур, биотопливо, экологические показатели.

В настоящее время энергетические потребности в сфере автотранспортного комплекса практически полностью удовлетворяются за счет ископаемых топлив, главным образом – нефтяных. Однако в связи с постоянным истощением мировых запасов нефти, удорожанием ее добычи и использованием как ценнейшего химического сырья другими отраслями народного хозяйства, становится очевидным, что в обозримый период времени этот источник энергоснабжения будет частично или полностью исчерпан [1].

Многие предприятия транспортно-технологического комплекса, расположенные в отдаленных от центра регионах, уже сейчас испытывают серьезные экономические и технологические трудности в обеспечении их необходимым количеством топлива для бесперебойной работы техники. Наиболее простейшим и эффективным практическим решением этой проблемы является перевод основных потребителей нефтяного топлива на другие виды энергоносителей, например, биологические источники энергии.

Весьма важно и то обстоятельство, что использование биомассы в качестве источника моторного топлива способствует решению глобальной экологической проблемы. При сжигании традиционных углеводородных топлив в энергетических установках в атмосферу выбрасывается большое количество двуокиси углерода. Ее накопление приводит к необратимым отрицательным процессам в биосфере, обусловленным так называемым парниковым эффектом. Использование биологического топлива позволяет сохранить баланс углекислого газа в атмосфере, так как выбросы при его сжигании сопоставимы с количеством углекислого газа, поглощаемым при выращивании биосырья в процессе фотосинтеза.

При этом считают, что любой вид биологического топлива для транспорта может рассматриваться как перспективный с учетом ряда обязательных условий.

Первое – наличие и доступность сырьевых ресурсов.

Второе – технология и оборудование для производства топлива в коммерческих объемах должны обеспечивать максимально низкую его стоимость, в том числе и в процессе его транспортировки, хранения и распределения.

Третье – топлива должны иметь высокие потребительские качества, среди которых обеспечение мощностных и экономических параметров энергоустановки.

Четвертое – топлива должны быть экологически безопасны как при производстве, транспортировке, хранении и заправке, так и при сгорании в двигателях.

К настоящему времени исследованы большое количество различных видов биологических энергоносителей и способы их применения в транспортных энергоустановках, которые

позволяют заменять разное количество традиционного топлива и по-разному влияют на их топливно-экономические показатели и экологические качества.

Чтобы объективно определить наиболее экологически безопасное и экономически выгодное биологическое топливо для транспортного ДВС нельзя опираться только на информацию о свойствах топлив. Для обоснованного выбора необходима уточненная оценка по эколого-экономическим качествам двигателя, работающего на данном топливе. В большинстве случаев для удовлетворения условий рабочего цикла ДВС отдельные виды биологических источников энергии целесообразно подвергать соответствующей химической (термохимической) переработке.

### **Моторные топлива из твердой биомассы**

Твердая биомасса, например, древесина – древнейший источник энергии. Её сырьевая база практически неисчерпаема. В настоящее время во многих странах проводится активный поиск возможностей использования местных источников энергии на основе твердой биомассы и разработки технических систем для получения из них моторных топлив [1]. При этом с учетом региональных условий могут быть использованы следующие сырьевые источники энергии: древесина, торф, всевозможные растительные отходы (солома, опад древесного листа, камыш, тростник, стебли кукурузы), отходы агропромышленных предприятий, перерабатывающих зерновые и технические культуры (хлопок, подсолнечник, лен и др.), отходы лесной и деревоперерабатывающей промышленности (опилки, стружка, кора, щепа, мелкие ветки) и т.д.

Наиболее известны и технологически отработаны методы получения моторного топлива из твердой биомассы путем ее газификации. Работы по газификации твердых видов биомассы (в частности, древесины) и использованию их в качестве моторного топлива начались в России еще в двадцатые годы. К настоящему времени созданы опытные образцы газогенераторных систем, которые по результатам испытаний подтвердили возможность организации эффективного процесса газификации биомассы.

Применение на отечественных автотранспортных средствах (АТС) продуктов газификации биомассы особенно актуально для регионов, имеющих на своей территории большие запасы растительной массы и сеть предприятий по переработке этой массы (древесина, кукуруза, соя и т.д.). При этом все биологические источники энергии относятся к виду ежегодно возобновляемых энергоресурсов, что позволяет для каждого региона, отдаленного от традиционных мест добычи и переработки нефти, создать устойчивую топливно-энергетическую базу, практически не зависящую от привозного углеводородного топлива.

Газообразные продукты, синтезированные из биомассы, могут использоваться в двигателях как в качестве основного топлива (газовый вариант двигателя), так и в качестве частичного заменителя жидкого углеводородного топлива (двигатели, работающие на двухкомпонентном топливе).

Следует отметить одну из важных особенностей использования продуктов газификации твердой биомассы в качестве топлива энергетических установок АТС. Известные способы организации процесса газификации древесины обеспечивают достаточно высокое содержание в генераторном газе высокоактивного химического реагента – водорода: до 12% и выше. Столь высокое содержание в синтезированном газе водорода позволяет рассматривать его не только как дополнительный энергетический компонент основного (жидкого) топлива, но и как эффективный физико-химический «инструмент» воздействия на кинетические и экологические показатели процесса сгорания в двигателе.

С учетом высокой реакционной способности химически не связанного водорода, которая проявляется им в реагирующей углеводородной среде, в рамках рабочей гипотезы следует отметить, что в сложном комплексе воздействия этого газа на внутрицилиндровые процессы двигателя наибольший интерес представляет ряд факторов, оказывающих влияние на экологические качества его рабочего цикла.

В присутствии добавленного к заряду водорода вследствие расширения пределов самовоспламенения топливно-воздушной смеси и дополнительного вовлечения в этот процесс

зон как с обедненным, так и с богатым составом происходит уменьшение концентрационной и температурной неоднородности рабочего тела и, как следствие этого, снижение выхода оксидов азота с продуктами сгорания. Кроме того, водород участвует в качестве реагента в реакции восстановления  $NO$  ( $2NO \rightarrow N_2 + O_2$ ), что способствует дополнительному снижению результирующего выхода оксидов азота в процессе сгорания [2].

К факторам, способствующим уменьшению содержания сажи в продуктах сгорания двигателя, относятся: ингибирование водородом актов образования зародышей сажевых частиц, замедление поверхностного роста частиц сажи (водородное торможение по Лангмюру), интенсификация выгорания твердых частиц в присутствии свободного водорода (по схеме реакции «мокрой газификации») [2].

Рассмотренное выше предпологаемое проявление воздействий свободного водорода на физико-химические акты формирования токсических веществ в процессе сгорания углеводородно-воздушной среды заимствовано из известных положений классической теории химической кинетики и в специфических условиях рабочего процесса дизеля отдельные эффекты этих воздействий могут, очевидно, проявляться в большей или меньшей степени. Однако при этом качественная сторона этих воздействий должна сохраниться, обуславливая тем самым возможность снижения в составе продуктов сгорания основных токсических компонентов, что и было подтверждено результатами эксперимента.

В рамках совместной научно-поисковой программы РУДН и МГТУ им. Н.Э. Баумана проведены исследования топливно-экономических и экологических показателей дизеля типа 2Ч 8,5/11 при его работе на дизельном топливе с добавлением к воздушному заряду водородосодержащих продуктов газификации древесины [3].

Для проведения исследований был создан опытный образец газогенераторной установки. Для повышения содержания в энергетическом газе водорода, а также для снижения тепловой напряженности конструкции газогенератора использовался дополнительный реагент – вода (водяной пар). Таким образом, в термохимическом цикле переработки древесины предусматривалась возможность комбинированного взаимодействия с углеродом исходного продукта двух различных по своим физико-химическим свойствам реагентов: кислорода воздуха (экзотермический реагент, реагирующий с древесным углеродом с выделением теплоты) и водяного пара (эндотермический реагент, взаимодействующий с углеродом с поглощением теплоты).

Существенное влияние на компонентный состав газогенераторного газа оказывает конструкция реактора и способ организации в нем процесса термохимического преобразования твердого топлива. Наибольшее распространение в промышленных (стационарных) газогенераторных установках имеет так называемый прямой процесс, предусматривающий подачу воздуха в реакционное пространство через нижнюю зону реактора, а выход энергетического газа через верхний отводящий канал.

В последние годы разработаны малогабаритные образцы генераторов, работа которых реализуется на основе обращенного процесса газификации. Генератор такого типа использовался при проведении исследований. Принципиальное отличие данного типа газогенератора заключается в том, что воздух поступает в реакционную камеру сверху и проходит слои газифицируемого твердого топлива, двигаясь к низу реактора, откуда и производится отбор продуктов окончательной газификации топлива.

Преимущества такого способа организации процесса газификации заключаются в том, что для его реализации можно использовать твердые топлива, содержащие смолы, а сам процесс отличается «гибкостью», то есть возможностью загрузки топлива в процессе совместной работы генератора с потребителем. Способ допускает использование различных видов твердых биомасс с любой степенью измельченности.

Предварительные исследования показали, что опытный генератор может работать как при принудительной подаче в реакционную камеру воздуха от вспомогательного нагнетателя, так и на «просос», то есть при самостоятельном поступлении воздуха в реактор за счет разряжения, создаваемого поршневым двигателем во впускном трубопроводе (куда и пода-

вался генераторный газ) на такте впуска.

Экспериментальная установка (моторный стенд) с дизелем 2Ч 8,5/11, созданная для проведения испытаний оснащалась штатными приборами и устройствами для измерения и регистрации параметров работы дизеля и включала в себя следующие дополнительные системы:

- газогенераторную систему для преобразования древесины в газовую смесь (энергетический газ) и подачи его во впускной тракт двигателя;
- систему охлаждения и очистки генераторного газа.

Очистка синтезированного газа подразделялась на две стадии: грубую (предварительную) и тонкую (окончательную). Для грубой очистки использовался двухступенчатый фильтр циклонного типа (степень очистки 90%). Фильтр тонкой очистки предназначался для окончательной очистки генераторного газа от водяных паров и мелких примесей перед их поступлением в систему питания двигателя. Система охлаждения, содержащая два теплообменника, обеспечивала снижение температуры генераторного газа практически до уровня температуры моторного помещения.

Запуск (розжиг) генератора производился до пуска двигателя с помощью запального устройства факельного типа, при этом воздух, для организации процесса преобразования древесины, подавался нагнетателем с электроприводом в течение всего периода прогрева реакционной камеры и выхода её на рабочий температурный режим.

Перед пуском дизеля в условиях автономной работы газогенераторной установки проводился контрольный анализ состава генераторного газа с использованием газоанализатора типа «Газохром-3101». В течение всего цикла моторных исследований состав генераторного газа по отдельным его компонентам изменялся (в зависимости от режима работы дизеля и производительности реактора) в следующих пределах:  $CO$  – 18 – 20%;  $H_2$  – 12 – 17%;  $CH_4$  – 2,5 – 3,0%;  $O_2$  – 0,4 – 0,6%;  $CO_2$  – 8 – 12%;  $N_2$  – 55 – 58%. При этом показатель энергетических качеств (теплота сгорания) генераторного газа варьировался в пределах 5,0 – 6,3 МДж/м<sup>3</sup>.

По результатам наблюдений выявлено, что функциональные возможности опытной моторной установки, работающей совместно с газогенератором, допускают изменения энергетически выгодного содержания генераторного газа в воздушном заряде дизеля (не приводящего к снижению его топливной экономичности) в пределе до 10%.

При удельном расходе содержащегося в генераторном газе водорода 1,4 г/(кВт·ч) для номинального режима работы дизеля зарегистрировано повышение его эффективного КПД на 5,5%; уменьшение содержания оксидов азота в отработавших газах на 15%, сажи – на 40%.

В целом результаты проведенного исследования подтвердили целесообразность использования в дизелях продуктов газификации твердой биомассы, в частности, древесины в качестве частичного заменителя традиционного (нефтяного) топлива. Их применение способствует существенному улучшению экологических качеств энергетической установки и экономии традиционного топлива, как за счет его частичной замены, так и за счет повышения эффективности рабочего цикла двигателя. Применение транспортных средств, оснащенных подобными энергетическими установками, расширяет эксплуатационные возможности этих средств, повышая экологическую безопасность их эксплуатации, одновременно частично решая при этом финансово-технологическую проблему заготовки моторного топлива.

### **Моторные топлива на основе масличных культур**

Из всех имеющихся в распоряжении человечества «солнечных энергетических источников» наиболее эффективным является масличное растение. Оно на биологическом уровне эффективно решает проблему аккумуляции энергии в содержащих масло зернах. В энергетический оборот могут быть вовлечены многие виды масличных культур. В отличие от нефтепродуктов, растительное масло не токсично, не имеет неприятного запаха, не содержит сернистых соединений, являющихся причиной кислотных дождей [4 – 7]. Уже сейчас на рынок Западной Европы поступает более 1,5 млн. тонн растительных масел. Полагают, что в ближайшие годы эта цифра возрастет в 1,5 – 2 раза [8].

О заметном возрастании интереса к моторным топливам растительного происхождения в последнее время свидетельствует тот факт, что в ряде зарубежных стран приняты перспективные программы поиска оптимального решения данной проблемы. Этому способствует и нынешняя ситуация на мировом рынке, при которой цены на коммерческое нефтяное топливо и растительные масла становятся сопоставимыми.

Мировой опыт показывает, что с учетом специфики химотологических свойств растительных масел их использование в качестве моторного топлива наиболее предпочтительно в транспортных дизелях, что наряду с экономией нефтяных топлив обуславливает существенное улучшение экологических качеств АТС.

Несмотря на отмеченные преимущества применения топлив биологического происхождения, до настоящего времени еще не найдены рациональные методы организации рабочего процесса дизеля с использованием альтернативных топлив подобного вида. Основной причиной этому является несоответствие физико-химических свойств растительных масел требованиям организации рабочего процесса в двигателе.

К одной из важнейших характеристик, определяющих энергоемкость, любого моторного топлива, относится низшая теплота сгорания, а также его плотность. Из таблицы 1 видно, что все виды топлива биологического происхождения имеют меньшую величину теплоты сгорания по сравнению с традиционным топливом. По плотности эти топлива отличаются от нефтяного (дизельного) топлива незначительно.

Таблица 1

#### Сравнительные физико-химические свойства топлив для дизелей

Название топлива	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Плотность, г/см <sup>3</sup>	ЦЧ	Кинематическая вязкость, мм <sup>3</sup> /с (при 20 <sup>0</sup> С)
Дизельное топливо	42,5	0,818	40 – 45	4,5
Рапсовое масло	37,3	0,915	34,0	75,0
50% смесь рапсового масла и дизельного топлива	40,0	0,867	39,5 (расчет)	39,8 (расчет)
Подсолнечное масло	36,9	0,920	33,4	62,2
Арахисовое масло	37,0	0,920	36,6	81,5

Для дизелей важным показателем качества топлива является склонность его к самовоспламенению, которая оценивается цетановым числом (ЦЧ). К сожалению, характеристики по воспламеняемости биологических топлив также не отвечают требованиям организации рабочего процесса дизеля (таблица 1). Тем не менее, смесевое топливо, содержащее, например, рапсовое масло и дизельное топливо в отношении 1:1, практически уже соответствует требованиям стандарта по показателю ЦЧ.

Большое влияние на процесс смесеобразования оказывает вязкость применяемого топлива. При увеличении вязкости, что является характерным признаком для топлив растительного происхождения (таблица 1), ухудшается качество процесса смесеобразования, возрастает неоднородность размеров и средний диаметр капель, изменяется геометрия топливного факела на выходе из сопловых отверстий топливной форсунки. Для уменьшения различия в показателях вязкости растительных масел и традиционного топлива используют следующие мероприятия.

1. Разбавление растительных масел дизельным топливом. Это наиболее простой и доступный способ. Однако при этом требуется проведение предварительных исследований по поиску оптимального соотношения компонентов смесевое топлива с учетом особенностей рабочего процесса и конструкции конкретного двигателя.
2. Приготовление эмульсий растительных масел с горючими или не горючими жидкостями, имеющими пониженную вязкость (вода, метанол, этанол, бутанол и др.). Это вызывает необходимость использования сложных систем эмульгирования, которые должны быть размещены в непосредственной близости от места эксплуатации дизельной техники. Нестабильность эмульгированного топлива и дополнительные затраты производственного

времени и финансовых средств существенно ограничивают возможности применения данного способа.

3. Переработка растительных масел в продукты, имеющие химическую структуру с меньшей молекулярной массой и, соответственно, низкую кинематическую вязкость, близкую к традиционному топливу. В настоящее время ряд зарубежных фирм уже освоили эффективную технологию глубокой переработки растительных масел в продукты, обладающие качествами нефтяного топлива.
4. Подогревание растительных масел перед их введением в двигатель. Необходимый уровень температуры, при котором их кинематическая вязкость достигает показателей традиционного топлива, соответствует  $85 - 90^{\circ}\text{C}$ . Данный способ предполагает использование энергоемких нагревательных устройств, что снижает рентабельность моторной установки и усложняет её конструкцию.

Анализ показывает, что более предпочтительным вариантом для отечественного транспорта является использование в качестве моторного топлива масла, получаемого из рапса, технология выращивания которого наиболее адаптирована к почвенно-климатическим условиям России. С целью изучения возможности использования рапсового масла в качестве моторного топлива в РУДН проведено экспериментальное исследование [9] показателей дизеля с рабочим объемом 0,624 л, работающего на смеси дизельного топлива и рапсового масла (соотношение компонентов смесового топлива 1:1). На этапе предварительного поискового исследования выбран вихрекамерный способ смесеобразования, предпочтительность которого по сравнению со способом непосредственного впрыскивания топлива обусловлена следующими причинами:

- рабочий процесс вихрекамерного дизеля менее чувствителен к изменению физико-химических свойств топлива;
- штифтовая форсунка этого двигателя обладает важным свойством самоочищения;
- высокая интенсивность вращения воздушного заряда в вихревой камере сгорания и наличие в ней горячей вставки позволяет уменьшить негативное влияние на процесс сгорания, вызванное изменениями характеристик топливоподачи и геометрических параметров струи при впрыскивании вязкого топлива.

В эксперименте использовалось очищенное рапсовое масло, имеющее цетановое число 34, вязкость  $75 \text{ мм}^3/\text{с}$ , низшую теплоту сгорания  $37,3 \text{ МДж/кг}$ , плотность  $0,915 \text{ г/см}^3$ . Для смесового топлива эти характеристики имели следующие показатели: 39,5; 39,8; 40; 0,867 (таблица 1).

Используемая для проведения опытов топливная аппаратура перед установкой на двигатель предварительно была апробирована на безмоторном стенде. В ходе апробации сделаны следующие наблюдения. При постоянном положении органа управления подачей топлива увеличенная вязкость смесового топлива способствует повышению количества впрыскиваемого топлива вследствие уменьшения утечек его через зазоры прецизионных пар насоса и форсунки в ходе нагнетания, возрастанию угла опережения впрыскивания. Отмечено ухудшение качества распыливания топлива, увеличение неоднородности размеров и среднего диаметра капель, а также глубины проникновения топливной струи в воздушной среде. Аппаратура длительное время работала на топливном стенде достаточно стабильно, сохраняя свои исходные характеристики.

Результаты предварительного этапа исследования показали следующее. Рассмотренные выше отличия физико-химических свойств смесового (биодизельного) топлива и характеристик топливоподачи предопределили качественное несовпадение в протекании рабочего цикла исследуемого дизеля и его традиционного аналога. По данным обработки индикаторных диаграмм рабочего цикла установлено, что процесс подготовки биодизельной смеси к воспламенению затягивается, о чем свидетельствует возрастание продолжительности индукционного периода, а само сгорание (тепловыделение) в объемно-кинетической стадии рабочего цикла протекает более вяло и затянуто по времени. Несколько возрастает и продолжительность основной (диффузионной) стадии сгорания. Увеличение длительности процесса

сгорания в целом, очевидно, является причиной возрастания тепловых потерь в биодизельном цикле, на что указывает снижение эффективного КПД дизеля в среднем на 5%.

Замена дизельного топлива на биодизельную смесь, хотя и обусловила снижение эффективности рабочего цикла, но существенно улучшила экологические качества дизеля. Выброс с отработавшими газами оксидов азота снизился на номинальном режиме работы двигателя на 15%, сажи – на 35%, газообразных продуктов неполного сгорания ( $CO$  и  $CH$ ) – в среднем на 10%.

Визуальным контролем, проведенным после окончания предварительного этапа испытаний, обнаружено, что на внешней стороне распылителя форсунки имеются рыхлые отложения бурого цвета. Проверка на топливном стенде показала, однако, что присутствие этих отложений на распылителе не сказывается на характеристиках топливоподачи, которые соответствовали исходным. Значительные отложения обнаружены на газовой поверхности вставки вихревой камеры. Их присутствие нежелательно, в первую очередь, по соображениям организации смесеобразования, которое в вихрекамерном дизеле в значительной степени зависит от состояния этой поверхности и её температурного уровня. Рыхлый налет на ней препятствует растеканию топливной пленки, уменьшая её поверхность. Кроме того, низкая теплопроводность продуктов, формирующих этот налет, нарушает тепловой режим испарения топливной пленки. Если иметь в виду, что в дизелях с малыми размерами вихревых камер в процессе смесеобразования преобладает пленочный (пристеночный) механизм, то наличие слоя отложений на поверхности вставки неминуемо влечет за собой соответствующие нарушения в протекании рабочего процесса.

Сделанные по результатам предварительного этапа испытаний наблюдения были учтены при последующей разработке мер по совершенствованию эффективных показателей биодизельного цикла:

- для компенсации потерь мощности двигателя, работающего на биодизельной смеси, увеличили цикловую подачу на величину, пропорциональную разнице значений теплоты сгорания дизельного и смесового топлив;
- учитывая пониженное ЦЧ топливной смеси и её низкую реакционно-кинетическую способность, в её состав добавляли 0,03% органической перекиси, которая выполняла роль активатора воспламенения и сгорания; предполагалось, что присутствие активатора в смесовом топливе должно уменьшить задержку воспламенения до значения, соответствующего стандартному дизельному топливу;
- для уменьшения общей продолжительности процесса сгорания к смесовому топливу подмешивали небольшую дозу (0,04%) активатора сгорания – ферроцена, участие которого в рабочем цикле дополнительно снижает сажевыделение в процессах сгорания биодизельного топлива;
- химический анализ отложений на стенках камеры сгорания установил, что они, в основном, содержат углеродистые компоненты; поэтому для их выжигания стенки покрывали тонким слоем (0,2 мм) хрома, который является эффективным катализатором, используемым в химических технологиях для конверсии углеводородов; каталитически активное покрытие наносили на поверхность стенок вихревой камеры методом термического напыления порошкообразной массы никеля и хрома, взятых в соотношении 4:1.

После проведения указанных мер была осуществлена опытная проверка эффективности их реализации. Анализ индикаторных диаграмм рабочего цикла показал, что на всех стадиях рабочего цикла характер выгорания биодизельной смеси с активирующими присадками практически идентичен сгоранию стандартного дизельного топлива. Отмечено лишь некоторое снижение нарастания давления и скорости тепловыделения в объемно-кинетической стадии сгорания при более интенсивном его протекании (догорании) на заключительном этапе диффузионной стадии. Общая продолжительность сгорания (тепловыделения) при использовании активирующих средств сократилась и соответствовала продолжительности сгорания стандартного дизельного топлива. Одновременно с этим зарегистрировано существенное снижение содержания сажи в продуктах сгорания по сравнению с данными предварительно-

го этапа испытаний дизеля (до 60% на номинальном режиме).

Присутствие присадок в топливе практически не отразилось на концентрациях в отработавших газах  $CO$  и  $CH$ . Следовательно, снижение содержания этих токсических компонентов в отработавших газах, зарегистрированное на обоих этапах испытаний дизеля, обусловлено наличием в смесевом топливе рапсового масла, в химической структуре которого содержится «собственный окислитель» – кислород (более 10%). Визуальная проверка состояния деталей камеры сгорания и цилиндропоршневой группы дизеля после проведения испытаний показала их полное соответствие норме.

Обобщая результаты проведенных исследований, следует отметить, что применение рапсового масла в дизелях целесообразно в качестве частичного заменителя традиционного моторного топлива с целью совершенствования их экологических качеств. Однако, при этом необходимо предусмотреть ряд мероприятий по доводке рабочего процесса. Применение рапсового масла в качестве основного топлива для дизеля, как показывает зарубежный опыт [4, 7, 9], требует существенных изменений его базовой конструкции и адаптации рабочего процесса к физико-химическим свойствам нового вида топлива.

Мировой опыт убедительно свидетельствует о том, что наиболее перспективным заменителем нефтяного топлива является не собственно рапсовое масло, а метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ). Это топливо, полученное на основе химической переработки (переэтерификации) рапсового масла, очень близко по комплексу физико-химических и моторных свойств к дизельному топливу (таблица 2) и поэтому не требует ни модернизации дизеля, ни дублирования системы питания.

Таблица 2

#### Основные физико-химические показатели дизельного топлива и МЭРМ

Показатели	Дизельное топливо	МЭРМ
Плотность при $15^0C$ , $кг/м^3$	847	856
Поверхностное натяжение при $T = 323K$ , $H/м$	$25,3 \cdot 10^{-3}$	$29,2 \cdot 10^{-3}$
Низшая теплота сгорания, $МДж/кг$	42,5	37,7
Цетановое число	45	48
Содержание серы, % масс.	0,250	0,005
Зольность, % масс.	0,025	0,008
Кинематическая вязкость при $T = 323K$ , $мм^2/с$	2,11	4,25
Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива $l_0$ , кг	14,35	12,6
Химический состав топлива, %:		
С	87,0	77,5
Н	12,6	12,0
О	0,4	10,5

Как моторное топливо оно имеет рабочее название: в России – *биодизель*, во Франции – *diester*, в Германии – *Biodiesel*, в Польше – *бионаливо*.

Применение в мире МЭРМ в качестве моторного топлива связано, в первую очередь, со значительным снижением эмиссии вредных веществ в отработанных газах, улучшением экологической обстановки в регионах интенсивного использования дизельной техники. Поэтому интерес к данному виду топлива в настоящее время постоянно возрастает. Страны ЕС приняли и реализуют развернутую программу перехода на биотопливо. Впервые его начали применять на транспортных средствах с дизельным приводом в Германии, Австрии, Франции и Швейцарии. С начала 90-х годов этот список стран дополнили Чехия, Словакия и Венгрия. Постоянно развивающиеся технологии получения биотоплива позволяют прогнозировать выравнивание в ближайшие годы стоимости нефтяного и биологического топлив [9 – 12].

Уже сейчас такие развитые страны, как Германия и Австрия, до 12% собственной потребности в дизельном топливе удовлетворяют за счет МЭРМ. В этих странах биотопливо в первую очередь предназначено для автобусов и автомобилей с дизелями, эксплуатирующихся



ся в крупных городах. В Европе МЭРМ используется по двум принципиальным схемам: «немецкая» и «французская».

«Французская» схема предусматривает централизованное производство *diestera* на мощных установках (5 – 10 тыс. тонн в год). В Германии в настоящее время действует около 12 централизованных и 80 децентрализованных заводов по производству рапсового масла, а топливо *Biodiesel* выпускает восемь немецких фирм.

«Немецкая» схема представляется более приемлемой для нынешнего состояния экономики России. Наиболее привлекательна эта схема для отдельных средних и крупных транспортных предприятий, расположенных в отдаленных регионах страны, для которых затраты на доставку топлива порой соизмеримы с его стоимостью. Эти предприятия могут самостоятельно приобрести небольшую автономную установку по производству и этерификации рапсового масла, которая способна полностью удовлетворить локальные потребности в топливе как данного предприятия, так и с определенной коммерческой выгодой весь дизельный транспортно-технологический комплекс региона. Понятно, что данная схема предусматривает необходимость вовлечения в технологический цикл по производству биотоплива местных сельскохозяйственных производителей рапса, обуславливая тем самым возможность расширения сферы их деятельности.

Заметим, что процесс получения биотоплива из семян рапса сопровождается выработкой богатого белком кормового жмыха и глицерина – продуктов, востребованных в национальном животноводстве и в пищевой промышленности. С учетом этого возможна организация «безотходного» производства указанных продуктов, каждый из которых будет востребован на рынке, а себестоимость биологического топлива будет снижаться, приближаясь к нефтяному.

К сожалению, в России до настоящего времени работы, связанные с технологией получения биотоплива и его использованием на транспорте, носят фрагментарный характер. Их результаты не привели к появлению на национальном рынке экологически чистого топлива, хотя имеются все предпосылки для этого.

Аккумулирующая солнечную энергию биомасса является практически неограниченной сырьевой базой для получения экологически чистого моторного топлива. Это обстоятельство должно стимулировать развитие транспортной биоэнергетики в нашей стране, обладающей по сравнению с европейскими странами значительно большими потенциальными возможностями для ее получения.

### Литература

1. Терентьев Г.А., Тюков В.М., Смаль Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. – М.: Химия, 1999. – 272 с.
2. Серебренников В.А., Батулин С.А., Румянцев В.В. Опыт применения присадок пароводородной смеси в транспортном дизеле // Двигателестроение. – 1992. №2. – С. 41 – 44.
3. Фомин В.М., Маслов Ю.Л. Исследование экологических характеристик дизеля, работающего с добавками к воздушному заряду продуктов синтеза древесины // Совершенствование мощностных, экономических и токсических характеристик ДВС. Труды VII Международного научно-практического семинара. – Владимир, 1999. – С. 76 – 79.
4. Лиханов В.А., Фоминых А.В., Копчиков В.Н. Работа дизеля на метаноле и рапсовом масле // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – №1. – С. 3 – 5.
5. Влияние состава смесевое биотоплива на параметры процесса впрыскивания топлива в дизеле / В.А. Марков, В.С. Акимов, В.А. Шумовский, В.В. Маркова // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №12. – С. 3 – 9.
6. Марков В.А., Девянин С.Н., Неверов В.А. Исследование работы дизеля на смесях дизельного топлива и соевого масла // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №11. – С. 3 – 9.
7. Лиханов В.А., Арасланов М.И., Козлов А.Н. Эффективные показатели дизеля 2С 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле с двойной системой топливоподачи // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №7. – С. 5 – 7.
8. Барковский Б.М., Кузьминов В.А. Платации горючего // Энергия. 1994. № 6. С. 70 – 80.

9. Фомин В.М., Ермолович И.В., Халиль А.С. Использование рапсового масла в качестве моторного топлива для дизелей // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – №5. – С. 11 – 12.
10. Фомин В.М. Анализ технологий химического преобразования альтернативных источников энергии в моторное топливо // Тракторы и сельхозмашины. - 2014. – № 10. С. 3 – 6.
11. Фомин В.М. Эффективное применение водородных энергоресурсов в структуре энергообеспечения АПК // Тракторы и сельхозмашины. - 2014. – № 6. – С. 3 – 7.
12. Перспективные автомобильные топлива – виды, характеристики, перспективы: Пер. с англ. / Под ред. Я.Б. Черткова. – М.: Транспорт, 1999. – 319 с.

### **Метод оценки тягово-динамических свойств автомобиля с колесной формулой 8×8 и индивидуальным приводом двигателей на стенде «Беговые барабаны»**

д.т.н. проф. Котиев Г.О., д.т.н. Горелов В.А., Захаров А.Ю.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[kotievgo@yandex.ru](mailto:kotievgo@yandex.ru)

*Аннотация.* Представлен новый принцип имитации реальных нагрузочных режимов при движении транспортного средства в условиях стенда «Беговые барабаны». Разработана математическая модель динамики автомобиля с колесной формулой 8×8 на стенде и на дороге. Результатами имитационного математического моделирования доказана работоспособность предложенного подхода к управлению стендом на примере динамики автомобиля с колесной формулой 8×8 и индивидуальным приводом двигателей. Обоснованы направления дальнейших научных исследований, базирующихся на представленном принципе.

*Ключевые слова:* колесная машина, экспериментальные исследования, стенд с беговыми барабанами, индивидуальный привод колес, закон управления, двигатель, угловая скорость, крутящий момент, математическая модель, имитационное моделирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках договора №9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Испытания являются неотъемлемой частью проектирования, технологического процесса изготовления и эксплуатации колесных машин [1].

Особенностью стендовых испытаний автомобильной техники на «беговых барабанах» является широкая возможность управления сочетаниями тяговых нагрузок, скоростных режимов, условий внешнего воздействия, причем установившийся режим может быть реализован длительное время, что позволяет обеспечить выполнение всех необходимых измерений, в том числе связанных с видео- и фоторегистрацией эксперимента [2].

В [2] отмечается, что к преимуществам испытаний типа на стендах с беговыми барабанами относятся широкий диапазон возможных режимов исследований, не зависящих от погодных-климатических условий, а также возможность автоматизации программ при проведении экспериментов. В то же время известно, что основным недостатком стендовых испытаний полноразмерных автомобилей является несоответствие условий качения автомобильных шин по барабану реальным дорожным покрытиям, которые сложно имитировать на поверхности барабанов. Решение данной проблемы может сделать испытания колесной техники на стендах «Беговые барабаны» самым предпочтительным по эффективности методом исследования. Таким образом, задача имитации на стенде дорожных условий является актуальной. В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан следующий подход к ее решению (рисунок 1а).

При пробеговых испытаниях колесной машины регистрируются показатели, определяющие движение в данных эксплуатационных условиях. Эти параметры являются входными для системы управления приводом стенда с беговыми барабанами. Управление приводными