
БИОЭНЕРГЕТИКА АВТОТРАНСПОРТА

Халиль Ибрагим Абдельсатер, Д.В. Шевченко

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

Рассматривается проблема обеспечения автотранспортного комплекса энергоносителями. Обосновывается эколого-экономическая целесообразность перевода энергетических установок транспортных средств на питание топливом, которое может быть получено из биомассы. Результатами проведенного экспериментального исследования подтверждена возможность использования в качестве частичных или полных заменителей дизельного топлива растительного масла и биотоплива, полученного на основе химической переработки рапса.

Ключевые слова: топлива растительного происхождения, биомасса, дизель, отработавшие газы, сажеобразование, активаторы воспламенения, рапс, диметилловый эфир, биодизель.

Из всех имеющихся в распоряжении человечества «солнечных энергетических источников» наиболее эффективными являются масличные растения. Они на биологическом уровне эффективно решают 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. Уже сейчас на рынок Западной Европы поступает более 1,5 млн т растительных масел. Полагают, что в ближайшие годы эта цифра возрастет в 1,5—2 раза [1; 2].

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 дизельное топливо и растительные масла становятся сопоставимыми.

Весьма важно и то обстоятельство, что использование растительных масел в качестве моторного топлива способствует решению глобальной экологической проблемы. При сжигании традиционных углеводородных топлив в энергетических установках в атмосферу выбрасывается большое количество двуокиси углерода [1; 3]. 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 его выбросы при сжигании топлива из биомассы сопоставимы с количеством углекислого газа, поглощаемым при выращивании этого сырья в процессе фотосинтеза.

Мировой опыт показывает, что при использовании растительных масел в качестве моторного топлива для транспортных дизелей наряду с экономией нефтяных топлив удастся существенно улучшить их экологические качества.

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. Основная причина этого — 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. 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 (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные физико-химические свойства топлив для дизелей

Вид топлива	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Плотность, г/см ³	ЦЧ	Кинематическая вязкость, мм ³ /с (при 20 °С)
Дизельное топливо	42,5	0,818	40...45	4,5
Рапсовое масло	37,3	0,915	34,0	75,0
50%-ная 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

Другим важным показателем качества топлива для дизелей 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 (см. табл. 1). Отметим, что смесевое топливо, содержащее, например, рапсовое масло и дизельное топливо в отношении 1 : 1, практически 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 (см. табл. 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 дизельного 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 негорючими 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, обладающими качествами нефтяного топлива.

4. Подогревание растительных масел перед их введением в дизель. Необходимый уровень температуры, при котором их кинематическая вязкость достигает показателей дизельного топлива, соответствует 85...90 °С. Данный способ предполагает использование энергоемких нагревательных устройств, что снижает рентабельность моторной установки и усложняет ее конструкцию.

Анализ показывает, что более предпочтительным вариантом для нашей страны 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 показателей дизеля с рабочим объемом 0,624 л [4; 5], работающего на смеси дизельного топлива и рапсового масла (соотношение компонентов смесового топлива 1 : 1). По результатам предварительного анализа 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 мм³/с, низшую теплоту сгорания 37,3 МДж/кг, плотность 0,915 г/см³. Для смесового топлива эти характеристики имели следующие значения: 39,5; 39,8; 40; 0,867 (см. табл. 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 рас-

пыливания 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 дизеля, работающего на смешанном топливе, показали следующее. Рассмотренные выше отличия физико-химических свойств экспериментального (смесового) топлива и характеристик топливоподачи предопределили качественное несовпадение в протекании рабочего цикла биодизеля и традиционного дизеля. 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 (СО и СН) — 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 ее температурного уровня. Рыхлый налет на ней препятствует растеканию топливной пленки, уменьшая ее поверхность. Кроме того, низкая теплопроводность продуктов, формирующих этот налет, нарушает тепловой режим испарения топливной пленки. В дизелях с малыми размерами вихревых камер в процессе смесеобразования преобладает пленочный (пристеночный) механизм, поэтому наличие слоя отложений на поверхности вставки неминуемо влечет за собой соответствующие нарушения в протекании рабочего процесса.

Наблюдения, сделанные на предварительном этапе испытаний, 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 смешанного топлив;

— учитывая пониженное цетановое число топливной смеси и ее низкую реакционно-кинетическую способность, в топливо добавляли 0,03% органической перекиси, которая выполняла роль активатора воспламенения и сгорания; присутствие активатора в смесевом топливе позволило уменьшить задержку воспламенения до значения, соответствующего стандартному дизельному топливу;

— для уменьшения общей продолжительности процесса сгорания к смесевому 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 содержат в основном углеродистые компоненты, поэтому для их выжигания стенки покрывали тонким слоем (0,2 мм) никрома, который является эффективным катализатором, используемым в химических технологиях для конверсии углеводов; каталитически активное покрытие наносили на поверхность вставки вихревой камеры методом термического напыления порошкообразной массы никеля и хрома, взятых в соотношении 4 : 1.

После проведения указанных мероприятий 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 предварительного этапа испытаний дизеля (до 60% на номинальном режиме).

Присутствие присадок в топливе практически не отразилось на концентрации в отработавших газах СО и СН. 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 цилиндра-поршневой 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 [2; 6], 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 основе химической переработки (переэтерификации) рапсового масла, очень близко по комплексу физико-химических и моторных свойств к дизельному топливу (табл. 2) и поэтому не требует ни модернизации дизеля, ни дублирования системы питания. Как моторное топливо оно имеет рабочее название: в России — «биодизель», во Франции — «diester», в Германии — «Biodiesel», в Польше — «биопаливо».

Постоянно растущее применение в мире МЭРМ связано в первую очередь со значительным снижением эмиссии вредных веществ в отработанных газах, улучшением экологической обстановки в регионах интенсивного использования дизельной техники.

Таблица 2

Основные физико-химические показатели дизельного топлива и МЭРМ

Показатель	Дизельное топливо	МЭРМ
Плотность при 15 °С, кг/м ³	847	856
Поверхностное натяжение при T = 323К, Н/м	25,3 · 10 ⁻³	29,2 · 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 = 323К, мм ² /с	2,11	4,25
Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива I ₀ , кг	14,35	12,6
Химический состав топлива, %		
С	87,0	77,5
Н	12,6	12,0
О	0,4	10,5

Интерес к данному виду топлива, обладающему высокими экологическими качествами, 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 1990-х гг. этот список стран пополнили Чехия, Словакия и Венгрия по причине перехода на оплату российской нефти по мировым ценам. Постоянно развивающиеся технологии получения биотоплива позволяют прогнозировать выравнивание в ближайшие годы стоимости нефтяного и биологического топлив [6].

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 в крупных городах. Во Франции для централизованного получения «diestera» созданы мощные установки с производительностью 5—10 тыс. т в год. В Германии топливо Biodiesel выпускает восемь фирм [2].

В таблице 3 приведены данные о количестве производимого в 2000 г. МЭРМ в Европе [2].

Таблица 3

Производство МЭРМ в Европе

Страна	Производственная мощность, тыс. т в год
Австрия	30
Бельгия	400
Чехия	48
Дания	32
Франция	370
Германия	203
Италия	441
Всего	1 524

Аккумулирующая солнечную энергию биомасса является практически неограниченной сырьевой базой для получения экологически чистого моторного топлива. Это обстоятельство, казалось бы, должно стимулировать развитие транспортной биоэнергетики в нашей стране, обладающей по сравнению с зарубежными странами значительно большими потенциальными возможностями ее воспроизводства. Заметим, что процесс получения биотоплива из семян рапса сопровождается выработкой богатого белком кормового жмыха и глицерина — продуктов, востребованных в отечественном животноводстве и 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 отечественном рынке экологически чистого топлива, хотя имеются все предпосылки для этого.

На основе данных математического моделирования и предварительных экспериментальных исследований на дизеле типа 4Ч 10,5/12 было установлено, что использование метилового эфира позволяет повысить топливно-экономические показатели двигателя. При этом обеспечивается снижение эмиссии с отработавшими газами оксидов азота до 10%, сажи примерно в 2 раза при сохранении исходных энергетических показателей двигателя.

В рамках планируемой на кафедре эксплуатации автотранспортных средств РУДН перспективной программы предполагается проведение исследований эколого-экономических показателей дизелей, использующих в качестве моторного топлива рапсовые компоненты, с целью дальнейшей разработки реальных технических и технологических решений по применению данного вида биотоплива на транспортных средствах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Барковский Б.М., Кузьминов В.А. Плантации горючего // Энергия. — 1994. — № 6. — С. 70—80.
- [2] Панчева Е.С., Кошкин Н.Л. Использование энергии биомассы в России: Проблемы и перспективы // Тезисы германо-российской конференции «Возобновляемые источники энергии и их роль в энергетической политике России и Германии». Фрайбург, 1994. — 24—26 октября.

- [3] Выбросы парниковых газов энергетическим комплексом России на период до 2020 года. — М.: Энергоиздат, 2001.
- [4] *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.
- [5] *Бендик М.М., Фомин В.М.* Биомасса — источник энергии для силовых установок сельскохозяйственной техники // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Сельскохозяйственные науки». — 2002. — № 8. — С. 93—97.
- [6] Перспективные автомобильные топлива — виды, характеристики, перспективы / Пер. с англ. / Под ред. Я.Б. Черткова. — М.: Транспорт, 1992.

MOTOR TRANSPORT BIO-ENERGETIC

Halil Ibragim Abdelsater, D.V. Shevchenko

Department of Motor Vehicles Operating
Engineering Faculty
People's Friendship University of Russia
Mikluho-Maklaya, 8-3, Moscow, Russia, 117198

Here is analyzed the problem of motor transportation complex maintenance with energy carriers. Ekologo-economic feasibility of vehicles power installations transfer on a fuel which can be received from a biomass is proved. Results of the spent experimental research confirm possibility of use as partial or full diesel fuel substitutes of vegetable oil and the biofuel which is received on the basis of rape chemical processing.

Key words: phytogenesis fuel, a biomass, the diesel engine, burnt gases, soot-containing, ignition activators, rape, dimethyl ether, a biodiesel engine.