

В. А. Марков, Н. А. Иващенко,
С. Н. Девянин, С. А. Нагорнов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОТОПЛИВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Подтверждена эффективность использования в дизелях биотоплив, получаемых путем этерификации растительных масел. Проанализированы физико-химические свойства биодизельных топлив, производимых из различных сырьевых ресурсов. Представлены результаты определения фракционного состава этих топлив. Проведены экспериментальные исследования показателей дизеля Д-245.12С, работающего на смесях дизельного топлива, метилового эфира рапсового масла и метилового эфира подсолнечного масла различного состава.

E-mail: markov@power.bmstu.ru; ivaschen@power.bmstu.ru;
devta@rambler.ru; snagornov@yandex.ru

Ключевые слова: дизельный двигатель, дизельное топливо, метиловые эфиры растительных масел, метиловый эфир рапсового масла, метиловый эфир подсолнечного масла.

Истощение нефтяных месторождений и продолжающийся рост цен на нефть и нефтепродукты делают неизбежным все более широкое использование в дизельных двигателях биотоплив на основе растительных масел. Перевод дизелей на биотоплива позволит не только обеспечить замещение топлив нефтяного происхождения топливами, производимыми из возобновляемых сырьевых ресурсов, но и заметно снизить токсичность отработавших газов (ОГ) и улучшить экологическую ситуацию в крупных городах и населенных пунктах сельской местности [1–3].

Для централизованного снабжения топливом автотранспорта больших городов в значительной степени пригодны сложные эфиры растительных масел — метиловые, этиловые и бутиловые, получаемые путем обработки растительных масел спиртами (соответственно метанолом, этанолом и бутанолом) [4, 5]. Из перечисленных эфиров более дешевыми являются метиловые эфиры. Причем сложные эфиры растительных масел можно получать из различных растительных масел — рапсового, подсолнечного, соевого, пальмового и др. Возможно использование для этих же целей животных жиров (говяжьего жира, свиного сала, рыбьего жира и др.).

Производство биодизельных топлив на основе растительных масел и животных жиров постоянно расширяется. Так, в 2005 г. выпуск биодизельного топлива в странах ЕС составил около 3,5 млн т, в 2009 г. его объем достиг 12 млн т, а в 2011 г. — около 18 млн т этого топли-

ва. Данные о динамике производства биодизельного топлива в некоторых странах ЕС представлены на рис. 1 [1].

Производство биодизельного топлива, млн т

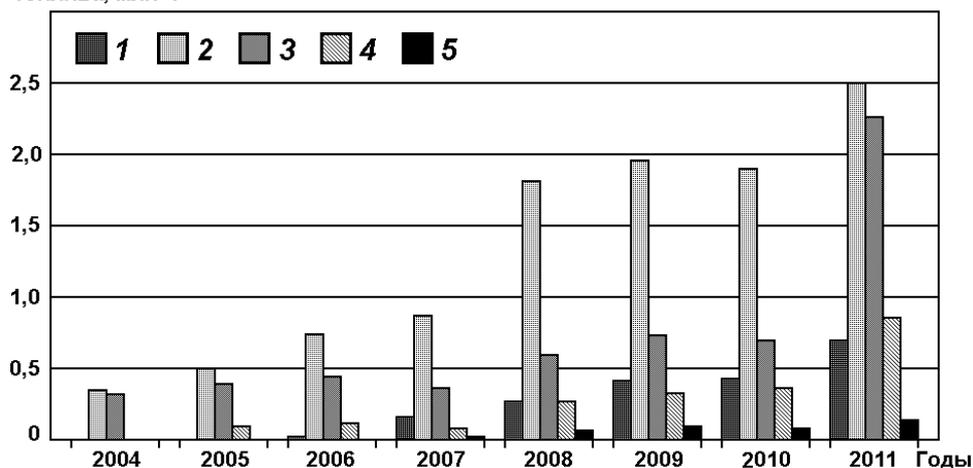


Рис. 1. Динамика роста производства биодизельного топлива (эфирь растительных масел и животных жиров) в европейских странах:

1 — Бельгия; 2 — Франция; 3 — Италия; 4 — Польша; 5 — Литва

Эфирь, получаемые из растительных масел, называются сложными: они не могут быть описаны простой химической формулой, поскольку являются смесями эфирь различных жирных кислот, входящих в состав растительных масел [6]. В сопоставлении с растительными маслами физико-химические свойства этих эфирь в большей степени приближены к свойствам нефтяного дизельного топлива. В первую очередь следует отметить пониженную по сравнению с растительными маслами вязкость указанных эфирь, а также их повышенное цетановое число, которое обычно превосходит цетановое число нефтяного дизельного топлива. В таблице приведены физико-химические свойства нефтяного дизельного топлива (ДТ) и метиловых эфирь растительных масел — рапсового и подсолнечного масел (соответственно МЭРМ и МЭПМ) [1].

Биодизельные топлива, предназначенные для использования в дизельных двигателях, должны за минимальный период сформировать в камере сгорания топливно-воздушную смесь, обеспечивающую ее легкое воспламенение, плавное и достаточно полное сгорание с минимальным содержанием сажи, токсичных и канцерогенных веществ в ОГ. Не допускается образование осадков в топливоподающей системе и нагароотложений на деталях двигателя. В связи с изложенным одной из основных проблем является организация рабочего процесса дизельных двигателей, работающих на биодизельных топливах.

Обеспечение современных требований к показателям топливной экономичности и токсичности ОГ дизельных двигателей возможно

лишь при дальнейшем совершенствовании процессов распыливания топлива и смесеобразования [7–9]. При этом скорость формирования топливно-воздушной смеси предопределяется как длиной и шириной топливных струй, так и их структурой (качеством распыливания), интенсивностью испарения топлива и диффузии его в сжатый воздух. Для достижения требуемого качества процесса смесеобразования топливо должно обладать заданным фракционным составом, который является одним из важнейших показателей эксплуатационных свойств топлив для двигателей внутреннего сгорания. Фракционный состав характеризует содержание в топливе различных фракций, выкипающих в определенных температурных пределах.

Физико-химические свойства топлив, вырабатываемых из растительных масел

Физико-химические свойства	Топлива на основе масла		
	ДТ	МЭРМ	МЭПМ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	877	886
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,8	8,0	7,0
Цетановое число	45	48	47
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг	14,3	12,67	12,53
Теплота сгорания низшая H_u , кДж/кг	42500	37 800	37200
Температура самовоспламенения, °С	250	230	240
Температура застывания, °С	–35	–21	–17
Содержание серы, % (мас.)	0,20	0,002	0,002
Содержание, % (мас.)			
С	87,0	77,6	76,7
Н	12,6	12,2	12,2
О	0,4	10,2	11,1
Коксуемость 10%-ного остатка, %, не более	0,2	0,3	0,3

При снятии характеристик фракционного состава для традиционного дизельного топлива обычно выделяют температуру начала перегонки (начала кипения), температуры перегонки 10, 50, 90 % топлива и температуру окончания перегонки (конца кипения), соответствующую перегонке 96 или 98 % топлива. Температура перегонки 10 % топлива характеризует склонность топлива к образованию паровых

пробок в системе питания дизеля. Наличие в топливе большого количества легких фракций приводит к увеличению жесткости сгорания (скорости нарастания давления и максимального давления сгорания) и снижению ресурса работы дизельного двигателя. Среднюю испаряемость топлива устанавливают по температуре выкипания 50 %, которая обуславливает испаряемость топлива и период задержки воспламенения. Наличие в топливе тяжелых трудноиспаряющихся фракций можно определить по температуре перегонки 90 %. По температуре окончания перегонки, соответствующей перегонке 96 или 98 % топлива, также выявляют присутствие в нем тяжелых (выкипающих при высоких температурах) фракций, чрезмерное содержание которых в топливе приводит к ухудшению испарения и усложнению образования однородной топливно-воздушной смеси. Высокая температура выкипания 96 % топлива свидетельствует о наличии тяжелых фракций, которые не только ухудшают смесеобразование, но и увеличивают нагарообразование на деталях цилиндропоршневой группы и тем самым снижают экономичность и надежность работы двигателя. При использовании топлива с большим содержанием тяжелых фракций некоторая их часть догорает в такте расширения, вызывая дымность ОГ и повышение их температуры, рост удельного расхода топлива, загрязнение моторного масла и деталей двигателя продуктами неполного сгорания топлива, прежде всего сажей.

Перечисленные выше факторы указывают на необходимость учитывать фракционный состав при выборе топлива для дизелей. Это также относится и к биодизельному топливу. Фракционный состав топлив определялся методом перегонки — путем разделения смеси жидкостей на компоненты, основанном на разности температур их кипения. Данный метод заключается в нагревании жидкости до кипения с последующей конденсацией паров в холодильнике.

На рис. 2 приведены кривые разгонки нефтяного ДТ и биодизельных топлив, полученных из различных растительных масел. Температура кипения нефтяного ДТ в процессе перегонки непрерывно увеличивается со 140 до 350 °С. Температура начала кипения биодизельных топлив, полученных из различных растительных масел, обычно колеблется от 220 до 285 °С. Исключение составляет масло редьки, для которого эта величина составляет 160 °С. При количестве испарившегося топлива более 10 % кривые разгонки сложных метиловых эфиров идут резко вверх. При повышении температуры выше $t = 310...330$ °С метиловые эфиры жирных кислот подвергаются термическому разложению.

При перегонке биодизельного топлива отмечено термическое разложение его компонентов; можно предположить, что оно происходит и при работе дизельного двигателя. Образующиеся продукты окисления и полимеризации являются причиной негативных процессов в двигателе — нагаро- и коксоотложения на деталях камеры сгорания. Температура выкипания 50 % фракций для нефтяного ДТ в

данном случае составляла 265 °С. Для всех биодизельных топлив эта температура намного выше: находится в интервале 300...330 °С. С этой точки зрения целесообразно использовать в качестве моторного топлива смеси нефтяного ДТ и метиловых эфиров растительных масел. В смесях с нефтяными ДТ указанные негативные свойства метиловых эфиров растительных масел в значительной степени нивелируются: эти компоненты хорошо смешиваются друг с другом в любых пропорциях с образованием стабильных смесей.

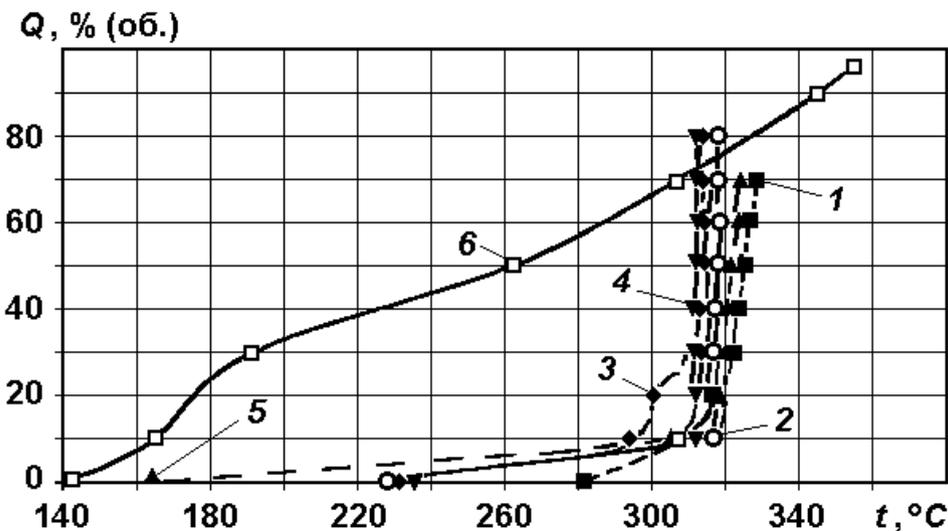


Рис. 2. Фракционный состав нефтяного дизельного топлива (6) и биодизельных топлив, полученных из рапсового (1), кукурузного (2), подсолнечного (3), льняного (4) масел и масла редьки (5)

Для анализа показателей токсичности ОГ дизельного двигателя, работающего на биодизельных топливах, проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) на смесях нефтяного ДТ и различных биотоплив на основе растительных масел. Указанный дизель выпускается Минским моторным заводом (ММЗ) для малотоннажных грузовых автомобилей ЗиЛ-5301 “Бычок”, а его модификации — для автобусов Павловского автомобильного завода (ПАЗ) и тракторов “Беларусь” Минского тракторного завода (МТЗ). Дизель типа Д-245.12С последовательно испытывали на нефтяном ДТ и на его смесях с МЭРМ (объемное содержание МЭРМ 0...60 %) и с МЭПМ (объемное содержание МЭПМ 0...40 %). Описание экспериментальной установки и методики проведения исследований приведены в работе [10].

Полученные результаты экспериментальных исследований дизеля на режимах внешней скоростной характеристики (рис. 3) свидетельствуют о том, что наибольший эффект от использования в качестве топлива смесей нефтяного ДТ и биотоплив на основе растительных

масел получен по дымности ОГ (K_x). В частности, рост концентрации МЭРМ в смесевом топливе $C_{MЭРМ}$ привел к значительному снижению дымности ОГ K_x (рис. 3, *a*). Так, при увеличении $C_{MЭРМ}$ с 0 до 60 % на режиме максимальной мощности при $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$ дымность K_x монотонно снижалась примерно в 2,6 раза (с 18 до 7 % по шкале Хартриджа). На режиме максимального крутящего момента при $n = 1\,500 \text{ мин}^{-1}$ дымность K_x уменьшилась примерно в 2,5 раза (с 21 до 8,5 % по шкале Хартриджа).

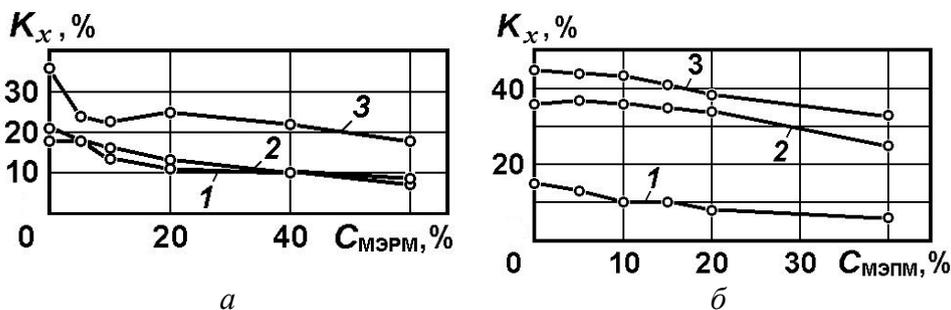


Рис. 3. Зависимость дымности отработавших газов K_x (% по шкале Хартриджа) дизеля Д-245.12С различной комплектации от объемного содержания метилового эфира рапсового масла $C_{MЭРМ}$ (*a*) и метилового эфира подсолнечного масла $C_{MЭПМ}$ (*б*) в смеси с нефтяным дизельным топливом на различных скоростных режимах внешней скоростной характеристики:

1 — $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$; 2 — $n = 1\,500 \text{ мин}^{-1}$; 3 — $n = 1\,080 \text{ мин}^{-1}$

Для определения соответствия исследуемого дизеля требованиям, предъявляемым к токсичности ОГ современными нормативными документами, дизель исследовали на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН [11]. Результаты определения удельных массовых выбросов нормируемых токсичных веществ в атмосферу на режимах этого испытательного цикла — оксидов азота e_{NO_x} , монооксида углерода e_{CO} , несгоревших углеводородов e_{CH_x} — представлены на рис. 4. Они свидетельствуют о заметной зависимости выбросов этих токсичных компонентов от состава смесевое биотоплива.

В частности, при увеличении содержания МЭРМ в смесевом топливе $C_{MЭРМ}$ с 0 до 20 % интегральные на режимах 13-ступенчатого цикла выбросы оксидов азота e_{NO_x} снизились с 7,286 до 6,542 г/(кВт·ч), т. е. на 10,2 % (рис. 4, *a*). При дальнейшем увеличении $C_{MЭРМ}$ до 40 и 60 % отмечен некоторый рост e_{NO_x} до значений соответственно 7,441 и 7,759 г/(кВт·ч), превышающих эти выбросы при работе на ДТ (7,286 г/(кВт·ч)). При повышении содержания МЭРМ в смесевом топливе с 0 до 60 % отмечено монотонное снижение удельных массовых

выбросов монооксида углерода e_{CO} с 2,834 до 1,932 г/(кВт·ч), т. е. почти в 1,5 раза (см. рис. 4, а).

Зависимость выбросов углеводородов CH_x от содержания МЭРМ в смесевом топливе имеет более сложный характер. При увеличении $C_{МЭРМ}$ с 0 до 5 % выброс e_{CH_x} уменьшился с 0,713 до 0,626 г/(кВт·ч), т. е. на 12,2 %, а при дальнейшем повышении содержания $C_{МЭРМ}$ до 20 % выброс e_{CH_x} возрос до 0,727 г/(кВт·ч), т. е. практически до исходного значения $e_{CH_x} = 0,713$ г/(кВт·ч). С ростом $C_{МЭРМ}$ до 40 и 60 % выброс e_{CH_x} вновь несколько уменьшился до значений, соответственно, 0,692 и 0,681 г/(кВт·ч). Но в целом влияние содержания МЭРМ в смесевом топливе на выброс углеводородов незначителен (см. рис. 4, а).

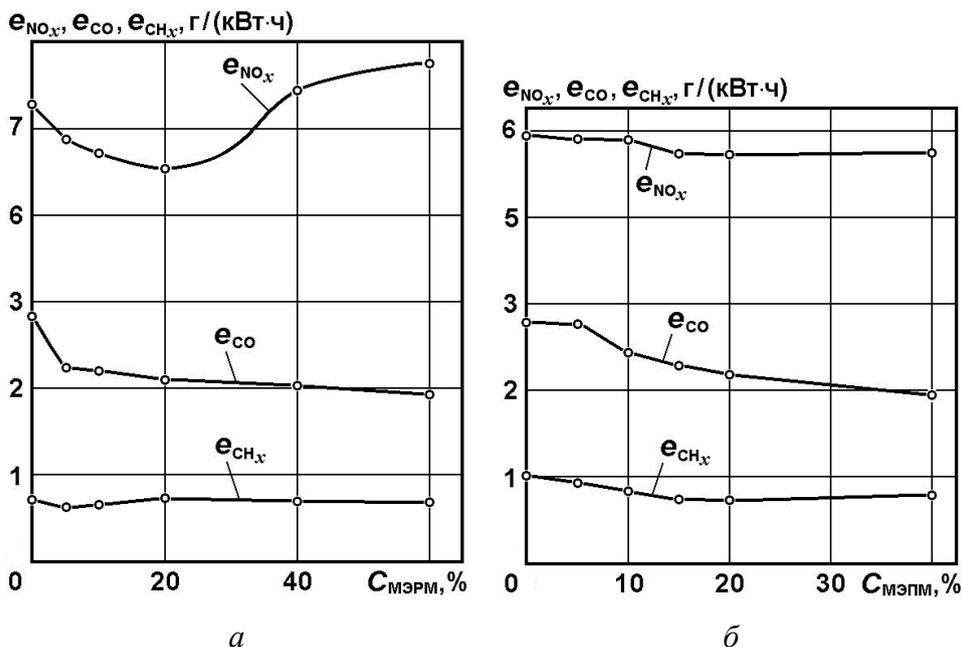


Рис. 4. Зависимость удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NO_x} , монооксида углерода e_{CO} , несгоревших углеводородов e_{CH_x} с отработавшими газами дизеля Д-245.12С различной комплектации от объемного содержания метилового эфира рапсового масла $C_{МЭРМ}$ (а) и метилового эфира подсолнечного масла $C_{МЭПМ}$ (б) в смеси с нефтяным дизельным топливом на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла

В заключение следует отметить, что приведенные данные экспериментальных исследований подтверждают возможность использования в дизелях биодизельных топлив, получаемых из различных сырьевых ресурсов. Наибольшее приближение к свойствам нефтяных

дизельных топлив обеспечивает применение смесей нефтяного дизельного топлива и метиловых эфиров растительных масел. При этом удается получать показатели токсичности отработавших газов, которые заметно лучше аналогичных показателей дизеля, работающего на чистом дизельном топливе. Причем улучшения показателей токсичности отработавших газов достигают даже при небольшом содержании биодизельного топлива в смеси. Это позволяет использовать исследованные биодизельные топлива в качестве экологических добавок к нефтяному дизельному топливу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Семенов, А.В. Шахов, В.В. Багров. М.: ООО НИЦ “Инженер”, 2011. 536 с.
2. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
3. Савельев Г.С. Применение газомоторного и биодизельного топлива в автотракторной технике. М.: ГНУ “ВИМ Россельхозакадемии”, 2009. 216 с.
4. Биоэнергетика: Мировой опыт и прогнозы развития / Л.С. Орсики, Н.Т. Сорочкин, В.Ф. Федоренко и др.; под ред. В.Ф. Федоренко. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2008. 404 с.
5. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск: Изд-во Восточноукраинского ун-та им. В. Даля, 2009. 240 с.
6. Тюкавкина Н.А., Бауков Ю.И. Биоорганическая химия: учеб. для вузов. М.: Дрофа, 2006. 542 с.
7. Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. М.: Изд. центр ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. 340 с.
8. Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 360 с.
9. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: учеб. пособие // В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов и др. М.: Легион-Автодата, 2008. 464 с.
10. Марков В.А., Шустер А.Ю., Девянин С.Н. Особенности применения метилового эфира рапсового масла в качестве топлива для дизелей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 3. С. 56–69.
11. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012