

В. А. Марков, А. В. Стремяков,  
С. Н. Девянин

## РАБОТА ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ НА СМЕСЯХ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И РАПСОВОГО МАСЛА

*Показаны преимущества использования в дизелях биотоплив, производимых на основе растительных масел. Приведены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245 малотоннажного автомобиля ЗиЛ 5301 “Бычок”, работающего на смесях дизельного топлива и рапсового масла различного состава. Подтверждена возможность значительного улучшения показателей токсичности отработавших газов исследуемого дизеля при его работе на смесевых биотопливах.*

**E-mail:** markov@power.bmstu.ru

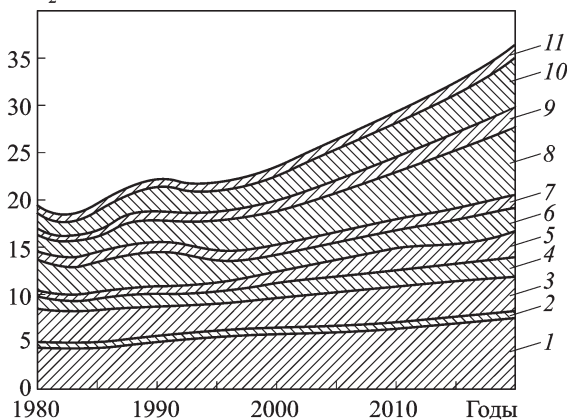
**Ключевые слова:** дизельный двигатель, дизельное топливо, рапсовое масло, токсичность отработавших газов.

В последнее время большой интерес вызывает использование в дизельных двигателях биотоплива, производимого из растительных масел [1–3], что можно объяснить возобновляемостью сырьевых ресурсов для производства этого топлива, хорошими экологическими качествами растительных масел и возможностью заметного снижения парникового эффекта при работе дизеля на таком биотопливе. Использование биотоплива позволяет обеспечить замещение нефтяного дизельного топлива (ДТ) альтернативным возобновляемым источником энергии, а также сохранение рабочих мест в сельскохозяйственных регионах.

Важным фактором использования в качестве топлива для дизелей растительных масел является их хорошие экологические качества. Растительные масла отличаются высокой биоразлагаемостью: попадая в почву и природные водные бассейны они практически полностью разлагаются в течение нескольких недель. Растительные масла имеют хорошие экологические свойства, обусловленные малым содержанием в них серы и полициклических ароматических углеводородов. Наличие в молекулах растительных масел достаточно большого числа атомов кислорода (8...12%), участвующих в процессе окисления углеводородов топлива, позволяет снизить выбросы в атмосферу продуктов неполного сгорания топлива.

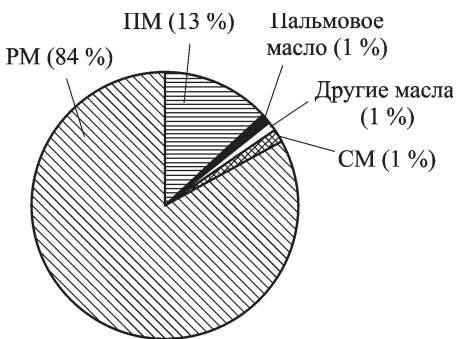
Применение биотоплива не нарушает баланса между кислородом и углекислым газом в атмосфере, поскольку при сгорании топлива растительного происхождения выделяется столько же углекислого газа, сколько растение поглотило из атмосферы за период своего существования. Важность этой проблемы подтверждается данными рис. 1, свидетельствующими о том, что в настоящее время в атмосферу ежегодно

$E_{CO_2} \cdot 10^9, \text{ т / год}$



**Рис. 1. Увеличение выбросов в атмосферу диоксида углерода  $E_{CO_2}$ , связанных с деятельностью человека в различных регионах мира:**

1 – США; 2 – Канада; 3 – Западная Европа; 4 – Япония и страны Тихоокеанского региона; 5 – Латинская Америка; 6 – страны бывшего СССР; 7 – Восточная Европа; 8 – Китай; 9 – Индия; 10 – остальная Азия; 11 – Африка



**Рис. 2. Распределение растительных масел для производства биотоплива в Европе**

сырьевых ресурсов (растительных масел) для производства биодизельного топлива в Европе.

При использовании РМ в качестве моторного топлива возможны два пути – централизованное и децентрализованное производство топлива. Централизованное производство предусматривает получение из РМ метилового эфира (МЭРМ) и снабжение им автотранспорта с помощью сети автозаправочных станций. В ряде стран Евросоюза в настоящее время на заправочных станциях отпускается биодизельное топливо, представляющее собой смесь 95% ДТ и 5% МЭРМ. На состоявшейся в ноябре 2005 г. в Магдебурге международной конференции представитель концерна Daimler Chrysler сообщил, что все автомобили, выпускаемые концерном, подготовлены к работе на топливах, содержащих 10% биотоплива [4]. Проведен ряд исследований

выбрасывается более 25 млрд т  $CO_2$ , а к 2020 г. ежегодные выбросы  $CO_2$  в атмосферу достигнут 35 млрд т [1].

Для производства биотоплива используются различные масла: рапсовое (РМ), соевое (СМ), подсолнечное (ПМ), пальмовое, кукурузное, арахисовое, льняное [1], но наибольшее практическое применение нашло рапсовое масло. На рис. 2 приведено распределение сырьевых ресурсов (растительных масел) для производства биодизельного топлива в Европе.

по адаптации дизелей различного назначения для такого биотоплива [5–8].

Следует отметить, что МЭРМ является химически активной жидкостью, поэтому при его использовании в качестве самостоятельного топлива или как добавки к ДТ топливные баки, топливопроводы и другие элементы конструкции, контактирующие с эфиром, должны иметь стойкое покрытие [1]. Другими недостатками МЭРМ являются недостаточная экологичность производства этого вида топлива (необходимость использования при производстве МЭРМ токсичного метилового спирта — метанола) и высокая цена по сравнению с ценой исходного растительного масла.

При децентрализованном производстве, как правило, используется простое фильтрованное РМ (либо в чистом виде, либо в смеси с ДТ). Преимущества децентрализованного производства РМ: экологичность и биоразлагаемость РМ, небольшие энергозатраты при его производстве, небольшие инвестиционные затраты, сокращение транспортных расходов. При этом обычно РМ применяется в качестве топлива непосредственно на месте его производства — в фермерских хозяйствах, на агропромышленных предприятиях и др.

При комплексном использовании рапса (т.е. при получении РМ и одновременном использовании в сельском хозяйстве растительной массы и жмыха, остающегося после отжима масла и являющегося ценным белковым продуктом для животноводства) затраты на производство РМ и ДТ оказываются примерно равными при урожайности рапса 7...9 ц семян рапса с гектара [1]. В условиях европейской части России урожайность семян ярового рапса обычно составляет 20...30 ц/га, а его потенциальная урожайность равна 30...40 ц/га, а в некоторых случаях и выше. Поэтому стоимость биотоплива на основе РМ соизмерима или несколько ниже стоимости ДТ. По данным за 2007 г. себестоимость одного литра РМ была равна 10...12 руб., цена одного литра МЭРМ составила около 20 руб., а одного литра ДТ превысила 20 руб. [9]. В ближайшей перспективе при широкомасштабном производстве РМ его цена будет значительно ниже стоимости ДТ.

Указанные факторы и определяют интерес, проявляемый к использованию чистого РМ в качестве топлива для дизелей [9–12]. Однако использование растительных масел в чистом виде в качестве топлива для дизелей сдерживается повышенным нагарообразованием — отложением кокса на распылителях форсунок и других деталях, образующих камеру сгорания. Увеличению нагарообразования способствует наличие в растительных маслах смолистых веществ, т.е. их повышенная коксуемость. Если дизельное топливо по ГОСТ 305–82 имеет коксуемость 10 %-ного остатка, не превышающую 0,3 %, то коксуемость большинства растительных масел обычно составляет 0,4...0,5 % (табл. 1). Для снижения коксуемости растительных масел необходимы их

очистка от смолистых веществ, а также использование смесей ДТ и РМ.

Таблица 1

**Физико-химические свойства различных топлив**

Физико-химические свойства	Топлива				
	ДТ	РМ	80 % ДТ + +20 % РМ	60 % ДТ + +40 % РМ	40 % ДТ + +60 % РМ
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	916	848	865	882
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,8	75	9	19	30
Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma$ при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42500	37300	41500	40400	39400
Цетановое число	45	36	41500	40400	39040
Температура самовоспламенения, °С	250	318	41500	40400	39040
Температура помутнения, °С	-25	-9	41500	40400	39040
Температура застывания, °С	-35	-20	41500	40400	39040
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,5	14,0	13,6	13,2
Содержание, % (масс.)					
С	87,0	77,0	85,0	83,0	81,0
Н	12,6	12,0	12,5	12,4	12,2
О	0,4	11,0	2,5	4,6	6,8
Общее содержание серы, % (масс.)	0,2	0,002	0,16	0,12	0,08
Коксуемость 10 %-ного остатка, % (масс.)	0,2	0,4	0,16	0,12	0,08

Еще одной проблемой, возникающей при работе дизеля на РМ, является его повышенная вязкость. Исследуя вязкостно-температурные характеристики (рис. 3), можно отметить, что при нормальной температуре  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкость РМ на порядок выше, чем у стандартного ДТ ( $\nu_{\text{Т}} = 75\text{ мм}^2/\text{с}$  у РМ и  $\nu_{\text{Т}} = 3,8\text{ мм}^2/\text{с}$  у ДТ, см. табл. 1). Но при повышении температуры вязкость РМ быстро снижается: при

$t = 40^\circ\text{C}$ , характерной для топливоподающих систем дизелей, вязкость РМ уменьшается вдвое (до  $\nu_T = 36 \text{ мм}^2/\text{с}$ ), а при  $t = 70^\circ\text{C}$  — до  $\nu_T = 17,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

Существенно меньшую вязкость имеют смеси РМ и ДТ. Вязкость смеси, содержащей 80% ДТ (по объему) и 20% РМ при  $t = 20^\circ\text{C}$  составляет  $\nu_T = 9 \text{ мм}^2/\text{с}$ , а при температуре  $t = 40^\circ\text{C}$ , характерной для условий систем топливоподдачи дизелей, снижается до  $\nu_T = 5 \text{ мм}^2/\text{с}$ , что соизмеримо с вязкостью чистого ДТ (в соответствии с ГОСТ 305–82 вязкость летнего ДТ составляет  $\nu_T = 3 \dots 6 \text{ мм}^2/\text{с}$ ).

Поскольку РМ по своим физико-химическим свойствам отличается от стандартных ДТ, то целесообразно применять смесевое биотопливо, представляющее собой смесь ДТ и РМ. Эти компоненты хорошо смешиваются, а смеси имеют приемлемые физико-химические свойства, позволяющие сжигать их в дизеле без внесения изменений в его конструкцию (см. табл. 1).

В МГТУ им. Н.Э. Баумана проведены исследования возможности работы дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) на смесях РМ и ДТ. 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). Некоторые параметры дизеля приведены в табл. 2.

Дизель исследовали на моторном стенде АМО “ЗиЛ” на режимах внешней скоростной характеристики и 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН с установочным углом опережения впрыскивания  $\theta = 13^\circ$  поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (ВМТ) и неизменным положением упора дозирующей рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД). Моторный стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ . Концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода  $\text{CO}$ , несгоревших углеводородов  $\text{CH}_x$  в ОГ определялись газоанализатором SAE-7532 японской фирмы Yanaco с погрешностями измерения указанных компонентов  $\pm 1\%$ .

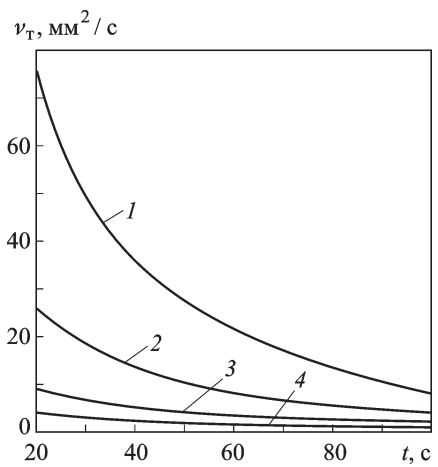


Рис. 3. Вязкостно-температурные характеристики РМ (1), смесей ДТ и РМ в соотношениях 50 на 50% (2) и 80 на 20% (3), зимнего ДТ (4)

## Некоторые параметры дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5)

Параметры	Значение
Тип двигателя	Четырехтактный, рядный, дизельный
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра $D$ , мм	110
Ход поршня $S$ , мм	125
Рабочий объем цилиндра $V_h$ , л	1,08
Общий рабочий объем $iV_h$ , л	4,32
Степень сжатия $\varepsilon$	16,0
Система турбонаддува	Турбокомпрессор ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов
Тип камеры сгорания, способ смесеобразования	Камера сгорания типа ЦНИДИ, объемно-плечное смесеобразование
Номинальная частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	2400
Номинальная мощность $N_e$ , кВт	80
Литровая мощность $N_{ел}$ , кВт/л	18,5
Механизм газораспределения	Клапанного типа с верхним расположением клапанов
Система охлаждения	Водяная, принудительная
Система смазки	Принудительная, с разбрызгиванием
Масляный фильтр	Сетчатый
Масляный насос	Шестеренчатый
Система питания	Разделенного типа
ТНВД	Рядный типа PP4M10U1f фирмы Motorpal с всережимным центробежным регулятором
Диаметр плунжеров ТНВД $d_{пл}$ , мм	10
Ход плунжеров ТНВД $h_{пл}$ , мм	10
Длина нагнетательных топливопроводов $L_T$ , мм	540
Форсунки	Типа ФДМ-22 производства ОАО “Куроаппаратура” (г. Вильнюс)
Распылители форсунок	Фирмы Motorpal типа DOP 119S534 с пятью сопловыми отверстиями диаметром $d_p = 0,34$ мм и проходным сечением $\mu_p f_p = 0,250$ мм <sup>2</sup>
Давление начала впрыскивания форсунок $p_{ф0}$ , МПа	21,5

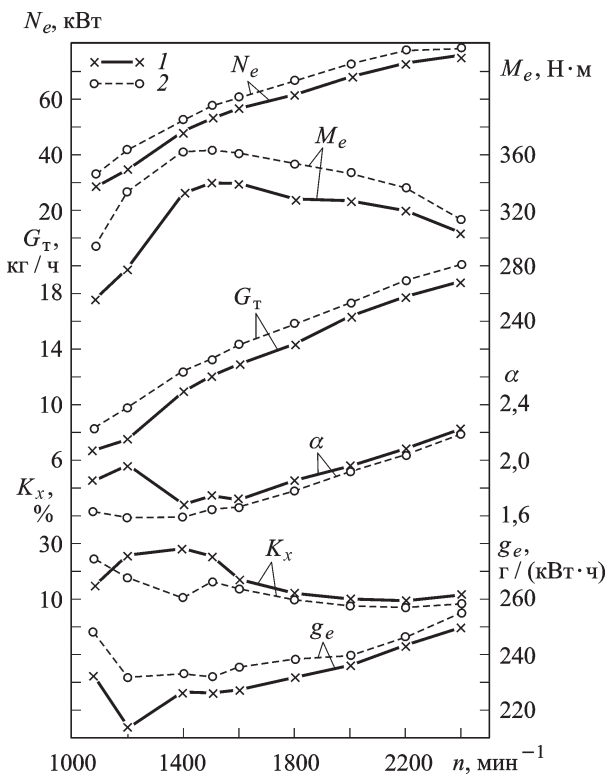
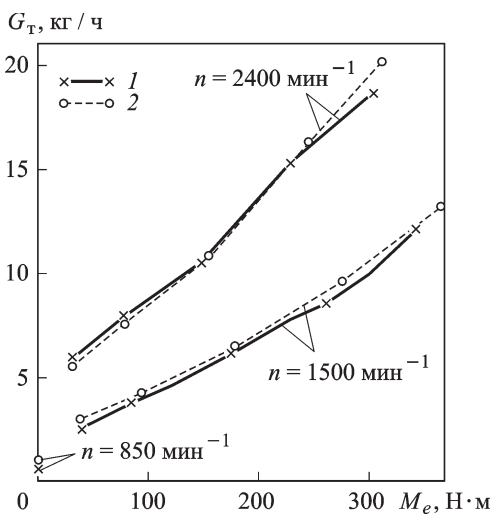


Рис. 4. Зависимости эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , расхода топлива  $G_T$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  и колленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики при использовании дизельного топлива (1) и смесового биотоплива (2)

На первом этапе дизель исследовался при его работе на ДТ и смесовом биотопливе, содержащем (по объему) 80% ДТ и 20% РМ. Испытания дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики показали заметное увеличение часового расхода топлива  $G_T$  при использовании смеси ДТ и РМ. При работе на таком смесовом биотопливе в исследуемом диапазоне частот вращения расход топлива  $G_T$  увеличился в среднем на 1,5... 2,0 кг/ч по сравнению с работой на ДТ (рис. 4). В результате эффективный крутящий момент двигателя  $M_e$  возрос на 40... 50 Н·м на режимах с низкой частотой вращения ( $n = 1000 \dots 1300 \text{ мин}^{-1}$ ) и на 10... 20 Н·м на режимах с высокой частотой вращения ( $n = 2000 \dots 2400 \text{ мин}^{-1}$ ). Соответственно увеличилась и эффективная мощность двигателя  $N_e$ .

Несмотря на значительное увеличение часового расхода топлива  $G_T$  при работе на смесовом биотопливе коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  снизился незначительно, особенно на режимах со средними и высокими частотами вращения. Это объясняется меньшим количеством воздуха, необходимого для сгорания 1 кг биотоплива (см. табл. 1). При переходе на биотопливо на режиме максимального крутящего момента



**Рис. 5.** Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  от частоты вращения  $n$  и эффективного крутящего момента  $M_e$  дизеля Д-245.12С при использовании дизельного топлива (1) и смесевого биотоплива (2)

максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ . При переводе дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  дымность ОГ  $K_x$  сократилась с 25 до 16 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — с 11 до 8 % (см. рис. 4).

Результаты экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла представлены на рис. 5–7. При переводе дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ, наиболее значительное увеличение часового расхода топлива  $G_T$  отмечено на режимах с полной нагрузкой (см. рис. 5). На режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  расход топлива  $G_T$  увеличился с 18,81 до 19,94 кг/ч, а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  — с 12,10 до 13,24 кг/ч. На режимах с неполной нагрузкой рост  $G_T$  при переходе на биотопливо оказался менее значительным, а на режиме холостого хода при  $n = 850 \text{ мин}^{-1}$  расходы  $G_T$  оказались равны 0,72 и 0,89 кг/ч соответственно при работе на ДТ и смесевом топливе.

Тип топлива оказывает влияние и на концентрацию в ОГ оксидов азота  $C_{\text{NO}_x}$  (см. рис. 6, а). На режиме холостого хода при  $n = 850 \text{ мин}^{-1}$  переход с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ привел к снижению  $C_{\text{NO}_x}$  с 0,0200 до 0,0180 %. На режимах со средними нагрузками отмечен заметный рост  $C_{\text{NO}_x}$ . Так, на режиме с  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  и  $M_e = 260 \dots 275 \text{ Н}\cdot\text{м}$  концентрация  $C_{\text{NO}_x}$  возросла с 0,0850 до

при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  удельный эффективный расход топлива  $g_e$  увеличился с 225,8 до 231,8 г/(кВт·ч), а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — с 249,0 до 255,1 г/(кВт·ч) по сравнению с работой на ДТ. Такое увеличение расхода биотоплива объясняется его меньшей теплотворной способностью  $H_u$  (соответственно 42,5 и 41,5 МДж/кг у ДТ и его смеси с РМ, см. табл. 1). Однако при использовании этих двух видов топлива эффективный КПД двигателя оказался практически одинаков:  $\eta_e = 37,5\%$  — на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  и  $\eta_e = 34,0\%$  — на режиме максимальной



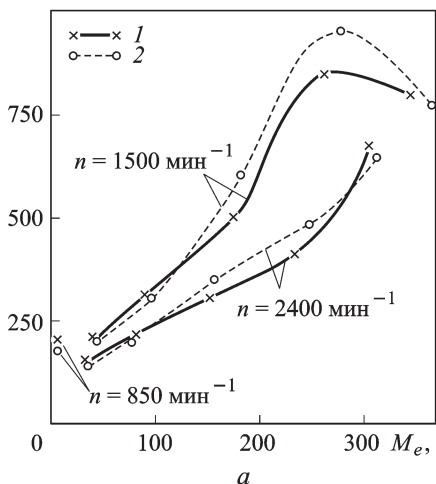
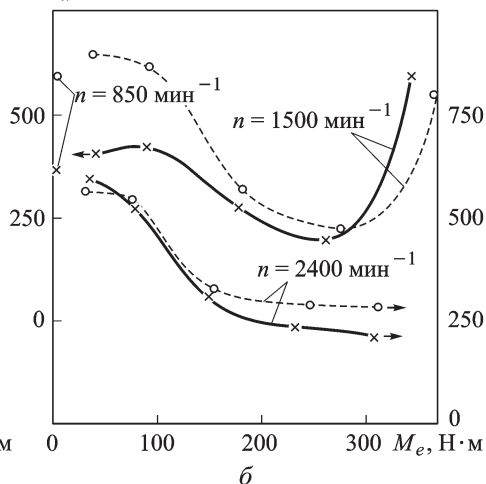
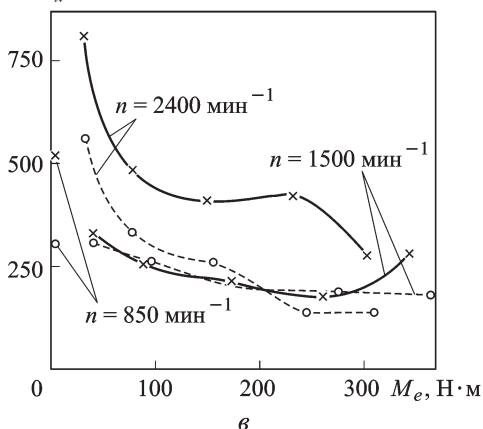
$C_{NO_x} \cdot 10^4, \%$  $C_{CO_x} \cdot 10^4, \%$  $C_{CO} \cdot 10^4, \%$  $C_{CH_x} \cdot 10^4, \%$ 

Рис. 6. Зависимости объемной концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{NO_x}$  (а), монооксида углерода  $C_{CO}$  (б) и несгоревших углеводородов  $C_{CH_x}$  (в) от частоты вращения  $n$  и эффективного крутящего момента  $M_e$  дизеля Д-245.12С при использовании дизельного топлива (1) и смесевого биотоплива (2)

0,0955 %. На режимах с малыми нагрузками ( $M_e = 30 \dots 150$  Н·м) и с полной нагрузкой переход с ДТ на смесевое биотопливо не сопровождался значительным изменением  $C_{NO_x}$ .

От типа применяемого топлива зависит и содержание в ОГ монооксида углерода  $C_{CO}$  (см. рис. 6, б). При переводе дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ наибольшее увеличение концентрации  $C_{CO}$  отмечено на режиме холостого хода при  $n = 850$  мин<sup>-1</sup> и на режиме с минимальной нагрузкой ( $M_e = 38 \dots 39$  Н·м) при  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>. На этих режимах концентрация  $C_{CO}$  возросла примерно в 1,6 раза. На первом из указанных режимов перевод дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ сопровождался увеличением  $C_{CO}$  с 0,0365 до 0,0600 %. На режимах же с высокими нагрузками ( $M_e > 280$  Н·м) при  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>

и с низкими нагрузками ( $M_e < 70 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  более высокие концентрации  $C_{\text{CO}}$  имели место при работе на ДТ.

Тип топлива оказывает наибольшее влияние на концентрацию в ОГ несгоревших углеводородов  $C_{\text{CH}_x}$  (см. рис. 6, в). Особенно заметно это влияние на режиме холостого хода при  $n = 850 \text{ мин}^{-1}$  и на всех нагрузочных режимах при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ . На указанных режимах перевод дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ сопровождался снижением  $C_{\text{CH}_x}$  в 1,5–2,0 раза (на первом из указанных режимов  $C_{\text{CH}_x}$  снизилась с 0,0520 до 0,0310 %).

По приведенным на рис. 6 характеристикам содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ) с использованием общепринятых методик рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы на режимах 13-ступенчатого цикла (соответственно  $e_{\text{NO}_x}$ ,  $e_{\text{CO}}$ ,  $e_{\text{CH}_x}$ ). С использованием приведенных на рис. 5 характеристик часового расхода топлива  $G_T$  определены значения удельного эффективного расхода топлива и эффективного КПД по известным зависимостям

$$g_e = \frac{1000G_T}{N_e}; \quad \eta_e = \frac{3600}{H_U g_e},$$

где  $H_U$  — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-ступенчатого цикла проведена по среднему (условному) удельному эффективному расходу топлива, который определялся с использованием зависимости [1]

$$g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{Ti} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i},$$

где  $G_{Ti}$  — часовой расход топлива на  $i$ -м режиме. Поскольку смесевое биотопливо имеет меньшую теплотворную способность, топливную экономичность дизеля при его работе на этих топливах целесообразно оценивать не удельным эффективным расходом топлива  $g_e$ , а эффективным КПД дизеля  $\eta_e$ , причем для интегральной оценки работы дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла определяли условный эффективный КПД из соотношения

$$\eta_{e \text{ усл}} = \frac{3600}{H_U g_{e \text{ усл}}}.$$

Результаты этих расчетов использованы при составлении табл. 3.

Приведенные в табл. 3 данные подтверждают возможность заметного улучшения экологических показателей дизеля Д-245.12С при его

## Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на смесевых биотопливах

Показатели дизеля	Объемная концентрация рапсового масла в смесевом биотопливе, %			
	0	20	40	60
Часовой расход топлива на режиме максимальных, кг/ч:				
мощности, $G_{т2400}$	18,81	19,94	20,3	20,7
крутящего момента, $G_{т1500}$	12,1	13,24	13,71	13,73
Крутящий момент на режиме максимальных, Н·м:				
мощности $M_{e2400}$	301	311	313	311
крутящего момента $M_{e1500}$	341	364	364	360
Дымность ОГ на режиме максимальных, %:				
мощности, $K_{x2400}$	11	8	7	8
крутящего момента, $K_{x1500}$	25	16,5	13	11
Удельный эффективный расход топлива на режиме максимальных, г/(кВт·ч):				
мощности $g_{e2400}$	249	255,1	258,1	265,1
крутящего момента, $g_{e1500}$	225,8	231,8	239,8	243,1
Эффективный КПД дизеля на режиме максимальных:				
мощности, $\eta_{e2400}$	0,34	0,34	0,345	0,345
крутящего момента, $\eta_{e1500}$	0,375	0,374	0,372	0,376
Условный удельный эффективный расход топлива на режимах 13-ступенчатого цикла $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)	247,2	254,38	259,4	272,23
Условный эффективный КПД на режимах 13-ступенчатого цикла $\eta_{e\text{ усл}}$	0,343	0,341	0,343	0,336
Интегральный удельный выброс, г/(кВт·ч):				
оксидов азота, $e_{\text{NO}_x}$	7,442	7,159	7,031	6,597
монооксида углерода, $e_{\text{CO}}$	3,482	3,814	3,880	3,772
углеводородов, $e_{\text{CH}_x}$	1,519	0,965	0,949	1,075

переводе с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ. При работе дизеля на смесевом биотопливе на режимах 13-ступенчатого цикла удельный массовый выброс углеводородов  $e_{\text{CH}_x}$  снизился с 1,519 до 0,965 г/(кВт·ч), т.е. на 36,5 %, выброс оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  — с 7,442 до 7,159 г/(кВт·ч), т.е. на 3,8 %, а выброс монооксида углерода  $e_{\text{CO}}$ , напротив, вырос с 3,482

до 3,814 г/(кВт·ч), т.е. на 9,5 % по сравнению с работой на стандартном ДТ. Рост эмиссии СО при работе на смесевом биотопливе отчасти связан с некоторым увеличением часового расхода этого топлива (на 6...10 %) и с соответствующим увеличением мощности дизеля. В частности, при переводе дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  эффективная мощность  $N_e$  увеличилась с 53,6 до 57,1 кВт, а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — с 75,5 до 78,2 кВт. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  остался при этом практически неизменным (соответственно 1,7 и 2,2 на указанных режимах), что объясняется меньшим количеством воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива (соответственно 14,3 и 13,9 кг/кг у ДТ и смеси 80 % ДТ и 20 % РМ, см. табл. 1).

Приведенные результаты исследований дизеля Д-245.12С получены при его работе на смесевом биотопливе, содержащем 80 % ДТ и 20 % РМ. Но определенный интерес представляет вопрос о влиянии состава смесевых биотоплив на характеристики дизеля. Оценка этого влияния позволяет провести оптимизацию состава смесевых биотоплив в целях достижения наиболее благоприятных показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля. Для этого проведены исследования дизеля Д-245.12С на чистом ДТ и смесевом биотопливе, содержащем от 20 до 60 % (об.) РМ. Физико-химические свойства этих смесей приведены в табл. 1, а результаты испытаний дизеля на этих топливах — на рис. 7 и в табл. 3.

Характеристики дизеля Д-245.12С, работающего на смесевых биотопливах, представленные на рис. 7, а, свидетельствуют о том, что увеличение содержания РМ в смесевом биотопливе  $C_{PM}$  от 0 до 20 % приводит к заметному росту часового расхода топлива  $G_T$  и эффективного крутящего момента  $M_e$ . При дальнейшем повышении  $C_{PM}$  от 20 до 60 % значения  $G_T$  и  $M_e$  изменяются незначительно. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  слабо зависит от концентрации  $C_{PM}$  во всем диапазоне ее изменения (0...60 %).

Характеристики удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД дизеля  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_x$  приведены на рис. 7, б и в табл. 3. На режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  увеличение концентрации РМ в смесевом биотопливе  $C_{PM}$  с 0 до 60 % приводит к росту удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  с 249,0 до 265,1 г/(кВт·ч) и снижению дымности ОГ  $K_x$  с 11,0 до 8,0 %. Аналогичное увеличение  $C_{PM}$  на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  сопровождалось ростом  $g_e$  с 225,8 до 243,1 г/(кВт·ч) и уменьшением  $K_x$  с 25,0 до 11,0 %. Приведенные данные свидетельствуют о том, что использование смесевых биотоплив позволило заметно уменьшить дымность ОГ. Указанное же увеличение удельного

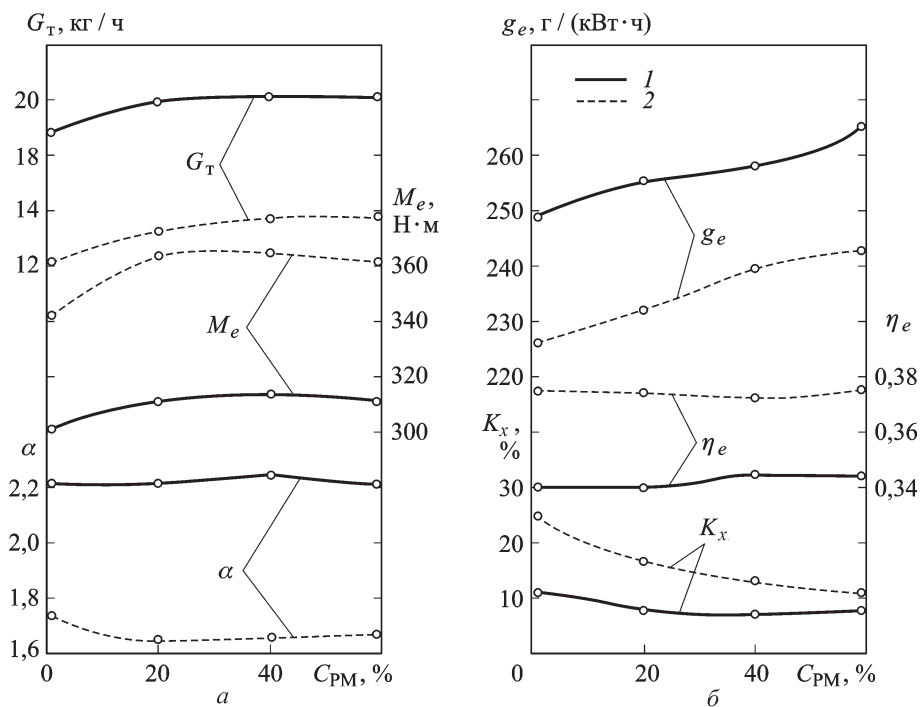


Рис. 7. Зависимости часового расхода топлива  $G_T$ , эффективного крутящего момента  $M_e$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (а), а также удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД двигателя  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_x$  от содержания рапсового масла  $C_{PM}$  в смешевом биотопливе на режимах внешней скоростной характеристики:

1 — на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 — на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

расхода смешевго биотоплива  $g_e$  объясняется его меньшей теплотворной способностью (см. табл. 1). При этом с ростом  $C_{PM}$  эффективность процесса сгорания практически не изменялась. Так, изменения эффективного КПД дизеля при работе на топливах с различным содержанием РМ не превышали 2% (см. табл. 3), что сопоставимо с точностью определения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ .

Значения удельных массовых выбросов токсичных компонентов  $e_{NO_x}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CH_x}$ , представленные в табл. 3, подтвердили возможность заметного улучшения экологических показателей дизеля при использовании смешевых биотоплив. Их применение позволяет снизить выбросы наиболее значимых токсичных компонентов ОГ дизелей — оксидов азота  $NO_x$ , а также углеводородов  $CH_x$ . Увеличение содержания РМ в смешевом биотопливе  $C_{PM}$  с 0 до 60% приводит к снижению удельных интегральных на режимах 13-ступенчатого цикла выбросов оксидов азота  $e_{NO_x}$  с 7,442 до 6,597 г/(кВт·ч), т.е. на 11,4%, и выбросов углеводородов  $e_{CH_x}$  с 1,519 до 1,075 г/(кВт·ч), т.е. на 29,2%. Причем минимум выбросов углеводородов ( $e_{CH_x} = 0,949 \text{ г/(кВт·ч)}$ ) отмечен при  $C_{PM} = 40\%$ .

В то же время увеличение  $C_{PM}$  с 0 до 60% приводит к росту удельных интегральных на режимах 13-ступенчатого цикла выбросов монооксида углерода  $e_{CO}$  с 3,482 до 3,772 г/(кВт·ч), т.е. на 8,3%. Причем максимум выбросов монооксида углерода ( $e_{CO} = 3,880$  г/(кВт·ч)) отмечен при  $C_{PM} = 40\%$ . Для снижения выброса монооксида углерода при работе дизеля на смесевых биотопливах необходимо дальнейшее совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования. В целом, проведенный комплекс экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С показал возможность оптимизации состава смесевого биотоплива с учетом минимизации расхода топлива, выбросов токсичных компонентов ОГ и преимущественных режимов работы транспортного дизеля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девянин С. Н., Марков В. А., Семенов В. Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – М.: ИЦ ФГОУ ВПО “МГАУ им. В.П. Горячкина”, 2008. – 340 с.
2. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: Учеб. пособие / В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов и др. – М.: Изд-во “Легион-Автодата”, 2008. – 464 с.
3. Лютко В., Луканин В. Н., Хачиян А. С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. – 311 с.
4. Zehn Prozent Biokraftstoff für Alle // Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Nachrichten. – 2005. – Jg. 59. – No. 47. – 8 s.
5. Braun F. Biodiesel: Ein Nutzer Erzählt // KFZ Anzeiger. – 1996. – Jg. 49. – No. 2. – S. 12–15.
6. Rokeer G. G. Rapsol-Methyl-Ester eignet sich als Ernanzung zu Dieselkraftstoff // Maschinenmarkt. – 1995. – Jg. 101. – No. 1/2. – S. 22–24.
7. Смайлис В., Сенчила В., Берейшене К. Моторные испытания РМЭ на высокооборотном дизеле воздушного охлаждения // Двигателестроение. – 2005. – № 4. – С. 45–49.
8. Марков В. А., Шустер А. Ю., Девянин С. Н. Работа дизелей на смесях дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 4. – С. 33–37.
9. Гражданкин Б. Рапс полностью обеспечит сельское хозяйство России дизельным топливом // Аграрный эксперт. – 2007. – № 8. – С. 20–25.
10. Широкомасштабные эксперименты по введению рапсового масла в дизельное топливо // Автомобильная промышленность США. – 1997. – № 3. – С. 5–9.
11. Neue Pflanzenolmotoren von DMS // MTZ. – 1993. – Jg. 54. – No. 7/8. – S. 365.
12. Савельев Г. С., Кочетков М. Н. Использование рапсового масла в качестве топлива в дизельных двигателях // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 1. – С. 62–66.

Статья поступила в редакцию 1.10.209

Владимир Анатольевич Марков родился в 1958 г., окончил в 1981 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области автоматического управления и регулирования двигателей внутреннего сгорания.



V.A. Markov (b. 1958) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1981. D. Sc. (Eng.), professor of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications in the field of automatic control and adjustment of internal combustion engines.

Андрей Васильевич Стремяков родился в 1985 г., окончил в 2008 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных работ в области адаптации дизелей к работе на альтернативных топливах.



A.V. Stremiyakov (b. 1985) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2008. Post-graduate of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 2 publications in the field of adaptation of engines to operation on alternative fuels.

Сергей Николаевич Девянин родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Московский автомобильно-дорожный институт (МАДИ). Д-р техн. наук, зав. кафедрой “Тракторы и автомобили” Московского государственного агроинженерного университета (МГАУ) им. В.П. Горячкина. Автор более 100 научных работ в области топливоподачи дизелей.



S.N. Devyanin (b. 1954) graduated from the Moscow Automobile and Road Institute in 1976. D. Sc. (Eng.), head of “Tractors and Automobiles” department of the Moscow State Rural Engineering University n.a. V.P. Goryachkin. Author of more than 100 publications in the field of fuel supply of diesels.