

УДК 621.436

В. А. Марков, А. Ю. Шустер,  
С. Н. Девянин

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТИЛОВОГО ЭФИРА РАПСОВОГО МАСЛА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛЕЙ

*Рассмотрена возможность использования в отечественных транспортных дизелях альтернативного топлива – метилового эфира рапсового масла. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С, работающего на смесях дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла. Показана зависимость показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов исследуемого дизеля от состава смеси топлива.*

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

**Ключевые слова:** дизель, дизельное топливо, рапсовое масло, метиловый эфир рапсового масла, топливная экономичность, токсичность отработавших газов.

Современный этап развития двигателестроения характеризуется увеличением потребления нефтяных топлив, повышением мировых цен на нефтепродукты и ухудшением экологической обстановки — все это вызвано быстрым ростом числа различных транспортных средств, при эксплуатации которых на территории РФ ежегодно сжигается около 110...115 млн т топлива и 12...15 млн т смазочного масла [1]. С отработавшими газами (ОГ) в атмосферу выбрасывается около 30 млн т вредных веществ, в том числе до 15 млн т монооксида углерода (СО), 12 млн т оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), 2 млн т несгоревших углеводородов ( $\text{CH}_x$ ), 1 млн т сажи (углерода) и  $2 \cdot 10^{12}$  МДж тепловой энергии. При этом одним из главных потребителей моторных топлив остается автомобильный транспорт — 56,5 % всех моторных топлив, сжигаемых в различных транспортных средствах, и 71,3 % всех вредных веществ, выделяемых в атмосферу наземным, водным и воздушным транспортом. Поэтому актуальной становится проблема поиска альтернативных источников энергии и снижения выбросов в атмосферу токсичных компонентов ОГ двигателей внутреннего сгорания.

В связи с указанными причинами все большее распространение на транспорте получают различные альтернативные топлива. Наиболее привлекательным представляется топливо растительного происхождения, получаемое из возобновляемых сырьевых ресурсов (биомассы,

растительных масел, отходов сельскохозяйственного производства и др.), являющихся практически неисчерпаемыми. Использование такого топлива обеспечивает кругооборот углекислого газа в атмосфере, поскольку при выращивании растительного сырья для производства биотоплива выделяется примерно такое же количество кислорода, которое потребляется при сгорании биотоплива.

Среди топлив растительного происхождения перспективным считается топливо, получаемое из растительных масел [2–4]. К масличным культурам относится более 150 видов растений, вырабатывающих масла. Сырьем для производства биодизельного топлива в разных странах служат масла различных растений. В Европе — это рапс, в США — соя, в Индонезии и на Филиппинах — пальмы (пальмовое масло), в Индии — ятрофа (*Jatropha*), в Африке — соя, ятрофа, в Бразилии — бобы кастора, в Китае, Японии, Индонезии — арахис.

При использовании рапсового масла (РМ) в качестве моторного топлива возможны — децентрализованное и централизованное производство топлив. При децентрализованном производстве, как правило, используется простое фильтрованное РМ либо в чистом виде, либо в смеси с дизельным топливом (ДТ). Преимущества децентрализованного использования РМ: экологичность и биоразлагаемость РМ, небольшие энергозатраты при его производстве, малые инвестиционные затраты, сокращение транспортных расходов, сохранение рабочих мест в сельскохозяйственных регионах. Обычно РМ применяется в качестве топлива непосредственно на месте его производства — в фермерских хозяйствах, агропромышленных предприятиях и др.

Централизованное производство предусматривает получение метилового эфира из РМ (МЭРМ) путем этерификации его метанолом. В результате реакции этерификации получают МЭРМ и побочный продукт — глицерин. Выделение глицерина из молекул жирных кислот РМ позволяет значительно снизить исходную вязкость РМ. В результате МЭРМ по своим физико-химическим свойствам приближается к свойствам стандартного ДТ. При этом ДТ и МЭРМ хорошо смешиваются в любых пропорциях и образуют стабильные смеси. Это позволяет обеспечить снабжение автотранспорта таким смесевым биотопливом с помощью имеющейся сети автозаправочных станций. В Германии в настоящее время работают 800 заправочных станций, где предлагается биодизельное топливо (Bio-Diesel). Обычно используется смесь, содержащая 95 % ДТ и 5 % МЭРМ. На международной конференции в Магдебурге представитель концерна Daimler Chrysler сообщил, что все автомобили, выпускаемые концерном, подготовлены к работе на топливах, содержащих 10 % биотоплива [5]. Проведен ряд исследований по адаптации дизелей различного назначения на биотопливе В20 (смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ), а также на смесях ДТ и МЭРМ раз-

личного состава [6-8]. Вместе с тем проблема использования смесей ДТ и МЭРМ в отечественных дизелях недостаточно изучена.

Оценка параметров двигателя, работающего на смесях ДТ и МЭРМ, проведена с использованием результатов экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) Минского моторного завода (ММЗ), предназначенного для малотоннажных грузовых автомобилей ЗиЛ-5301 “Бычок”, а его модификации — для автобусов Павловского автомобильного завода (ПАЗ) и тракторов “Беларусь” Минского тракторного завода (МТЗ). Некоторые характеристики исследуемого дизеля приведены в табл. 1.

Дизель исследовался 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 (п.к.в.) до верхней мертвой точки (ВМТ) и неизменным положением упора дозирующей рейки ТНВД. При этом основными исследуемыми режимами внешней скоростной характеристики являлись режимы максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ . При измерении дымности ОГ режим минимальной частоты вращения составлял  $n = 1080 \text{ мин}^{-1}$ . Дымность измеряли с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью  $\pm 1 \%$ . Концентрации  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  в ОГ определяли газоанализатором SAE-7532 японской фирмы YANACO с погрешностями  $\pm 1 \%$ .

Исследуемый дизель работал на смесях ДТ (ГОСТ 305–82) и МЭРМ, полученного на одном из заводов Германии из рапса, выращенного в России. Физико-химические свойства этого МЭРМ соответствовали требованиям Европейского стандарта EN 14214:2003 “Автомобильные топлива. Метилловые эфиры жирных кислот (FAME) для дизельных двигателей. Требования и методы испытаний”. Некоторые физико-химические свойства исходных ДТ и МЭРМ и их смесей приведены в табл. 2 (для смесевых топлив указано объемное процентное содержание ДТ и МЭРМ).

На первом этапе экспериментальных исследований дизель Д-245.12С испытывался на режимах внешней скоростной характеристики при работе на ДТ и смеси 80 % ДТ и 20 % МЭРМ (указано объемное содержание компонентов). В связи с большей плотностью и повышенной вязкостью указанной смеси ДТ и МЭРМ при испытаниях отмечен рост часового расхода смесевое биотоплива по сравнению с расходом ДТ на всех исследованных режимах внешней скоростной характеристики. Так, на режиме максимальной мощности при частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  часовые расходы ДТ и смеси ДТ и МЭРМ составляют соответственно  $G_T = 19,13$  и  $19,76 \text{ кг/ч}$ , а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  — соответственно

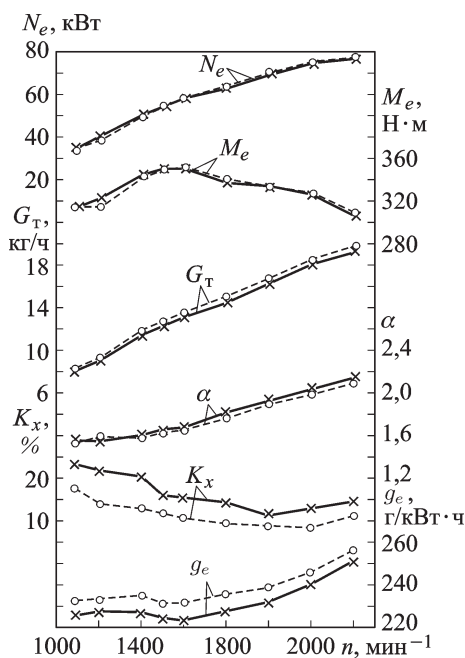
## Некоторые характеристики дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5)

Параметр/Компонент	Значение/Описание
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
Система турбонаддува	Турбокомпрессор ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов
Тип КС, способ смесеобразования	КС ЦНИДИ, объемно-пленочное 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	Клапанный, с верхним расположением клапанов
Система охлаждения	Водяная, принудительная
Система смазки	Принудительная, с разбрызгиванием
Фильтр масляный	Сетчатый
Насос масляный	Шестеренчатый
Система питания	Разделенного типа
Топливный насос высокого давления (ТНВД)	Рядный типа РР4М10У1f фирмы Motorpal с все-режимным 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	Типа DOP 119S534 (фирмы Motorpal) 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 $p_{фо}$ , МПа	21,5

## Физико-химические свойства исследуемых топлив

Свойства	Топливо						
	ДТ	МЭРМ	95 % ДТ + 5 % МЭРМ	90 % ДТ + 10 % МЭРМ	80 % ДТ + 20 % МЭРМ	60 % ДТ + 40 % МЭРМ	40 % ДТ + 60 % МЭРМ
Плотность, кг/м <sup>3</sup> , при 20°С	830	877	832	835	839	848	858
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с, при 20°С	3,8	8,0	3,94	4,09	4,41	5,2	6,0
Коэффициент поверхностного натяжения, мН/м, при 20°С	27,1	30,7	Нет данных				
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	37,8	42,2	41,9	41,5	40,5	39,6
Цетановое число	45	48	Нет данных				
Температура са- мовоспламенения, °С	250	230	Нет данных				
Температура помутнения, °С	-25	-13	Нет данных				
Температура застывания, °С	-35	-21	Нет данных				
Количество возду- ха, необходимого для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,6	14,2	14,1	14,0	13,6	13,3
Массовое содер- жание, %							
С	87,0	77,6	86,5	86,1	85,1	83,2	81,4
Н	12,6	12,2	12,6	12,5	12,5	12,4	12,3
О	0,4	10,2	0,9	1,4	2,4	4,4	6,3
Общее массовое содержание серы, %	0,20	0,002	0,19	0,18	0,16	0,12	0,08
Коксуемость 10 %-ного остатка, % по массе	0,2	0,3	Нет данных				

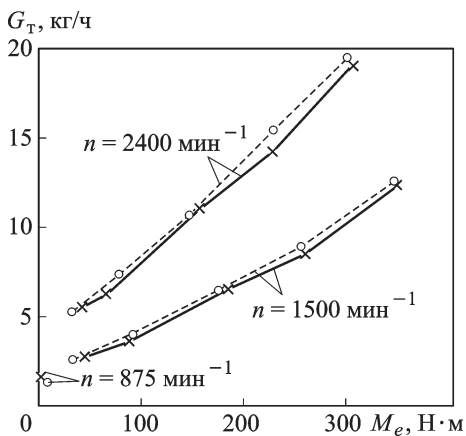
**Рис. 1.** Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , часового расхода топлива  $G_T$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики при использовании различных топлив: сплошные кривые — ДТ; штриховые — смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ



$G_T = 12,30$  и  $12,68$  кг/ч (рис. 1). Но при этом теплотворная способность смесового биотоплива несколько ниже теплотворной способности ДТ. В результате эти два фактора компенсируют друг друга, и мощностные показатели дизеля (эффективная мощность  $N_e$  и крутящий момент  $M_e$ ) изменяются незначительно. При переводе дизеля Д-245.12С с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ на режиме максимальной мощности при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> отмечен небольшой рост крутящего момента  $M_e$  с 306 до 308 Н·м, а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>, напротив, его снижение с 351 до 349 Н·м. Такое незначительное изменение мощностных показателей не требует изменения исходных регулировок дизеля.

В связи с наличием в молекулах МЭРМ атомов кислорода его низшая теплота сгорания оказывается несколько меньше низшей теплоты сгорания ДТ. Поэтому при работе дизеля на смеси 80 % ДТ и 20 % МЭРМ отмечено некоторое увеличение удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ . При переводе дизеля Д-245.12С с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ на режиме максимальной мощности при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> расход топлива  $g_e$  вырос с 249,2 до 255,3 г/(кВт·ч), а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> — с 223,2 до 230,6 г/(кВт·ч).

Наличие в молекулах МЭРМ атомов кислорода благоприятно сказывается на дымности ОГ  $K_x$  (выбросе сажи), которая при использовании смесового биотоплива снижается во всем диапазоне исследованных скоростных режимов внешней скоростной характеристики. При переводе дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ на режиме



**Рис. 2.** Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  от скоростного и нагрузочного режимов (частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$ ) дизеля Д-245.12С при использовании различных топлив (обозначения кривых – см. рис. 1)

Так, при переводе дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ лишь на режиме холостого хода при минимальной частоте вращения  $n = 875 \text{ мин}^{-1}$  расход топлива  $G_T$  практически не изменился и составил около 0,8 кг/ч, на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  он увеличился с 12,30 до 12,57 кг/ч, а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  – с 18,94 до 19,34 кг/ч.

При переводе дизеля Д-245.12С с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ объемная концентрация в ОГ  $C_{NO_x}$  снижается на большинстве режимов 13-ступенчатого цикла (рис. 3, а). На режиме холостого хода при  $n = 875 \text{ мин}^{-1}$  концентрация  $NO_x$  в ОГ снизилась с 0,0140 до 0,0100 %, на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  – с 0,0610 до 0,0600 %, на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  – с 0,0550 до 0,0510 %. Максимальная концентрация  $NO_x$  в ОГ ( $C_{NO_x} = 0,0725 \%$ ) отмечена при работе дизеля Д-245.12С на ДТ на режиме с частотой вращения  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  и нагрузкой  $M_e = 255 \dots 260 \text{ Н·м}$ . При работе дизеля на этом же режиме на смеси ДТ и МЭРМ содержание  $NO_x$  в ОГ снизилось до  $C_{NO_x} = 0,0700 \%$ .

Использование смесового биотоплива благоприятно сказывается и на концентрации в ОГ оксида углерода СО (рис. 3, б). При переводе дизеля Д-245.12С с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ на режиме холостого хода при  $n = 875 \text{ мин}^{-1}$   $C_{CO}$  снизилась с 0,0330 до 0,0240 %, на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  – с 0,0480 до 0,0330 %, на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  – с 0,0240 до 0,0165 %.

максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  дымность ОГ снизилась с 18 до 11 % по шкале Хартриджа, на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  – с 21 до 13 %, а на режиме внешней скоростной характеристики при  $n = 1080 \text{ мин}^{-1}$  – с 36 до 25 % (см. рис. 1).

Результаты испытаний дизеля Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого цикла приведены на рис. 2, 3. Приведенные на рис. 2 характеристики часового расхода топлива  $G_T$  свидетельствуют о том, что замена ДТ смесевым биотопливом приводит к небольшому увеличению  $G_T$  практически на всех исследованных нагрузочных режимах.

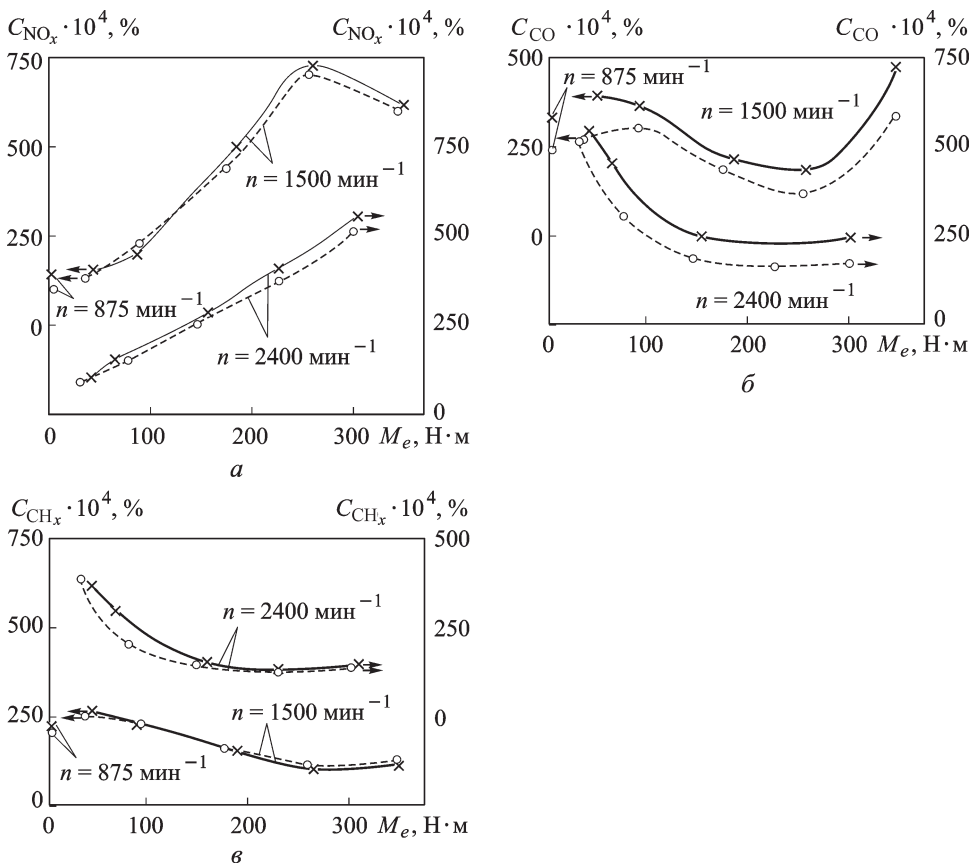


Рис. 3. Зависимость объемной концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{NO_x}$  (а), монооксида углерода  $C_{CO}$  (б) и углеводородов  $C_{CH_x}$  (в) от скоростного и нагрузочного режимов (частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$ ) дизеля Д-245.12С при использовании различных топлив (обозначения — см. рис. 1)

В меньшей степени смесевое биотопливо влияет на концентрацию в ОГ углеводородов  $CH_x$  (рис. 3, в). Если на режиме холостого хода при  $n = 875 \text{ мин}^{-1}$  перевод дизеля Д-245.12С с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ привел к снижению  $C_{CH_x}$  с 0,0212 до 0,0205 %, а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — с 0,0140 до 0,0135 %, то на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $CH_x$  в ОГ, напротив, возросло с 0,0110 до 0,0120 %. Однако указанные изменения  $C_{CH_x}$  являются незначительными.

По представленным на рис. 3 данным о содержании в ОГ газообразных токсичных компонентов ( $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH_x$ ) рассчитаны интегральные удельные массовые выбросы токсичных компонентов на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла ЕСЕ R49 [3]. При оценке токсичности сначала для каждого режима рассчитывались часовые массовые выбросы токсичных компонентов ОГ ( $E_{NO_x}$ ,  $E_{CO}$ ,  $E_{CH_x}$ ). Полученные значения вредных выбросов суммировались за весь цикл по



каждому компоненту (с учетом коэффициентов  $K_i$ , отражающих долю времени каждого режима) и затем делением на условную среднюю мощность дизеля за испытательный цикл определялись удельные выбросы вредных веществ по формулам

$$e_{\text{NO}_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{NO}_{xi}} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}; \quad e_{\text{CO}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{CO}_i} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}; \quad e_{\text{CH}_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{CH}_{xi}} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i},$$

где  $E_{\text{NO}_{xi}}$ ,  $E_{\text{CO}_i}$ ,  $E_{\text{CH}_{xi}}$  — массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода и несгоревших углеводородов на  $i$ -м режиме 13-ступенчатого цикла, г/ч;  $N_{ei}$  — мощность двигателя на этом режиме, кВт;  $K_i$  — коэффициент, отражающий долю времени  $i$ -го режима. Значения удельного эффективного расхода топлива и эффективного КПД определялись 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 [3]

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

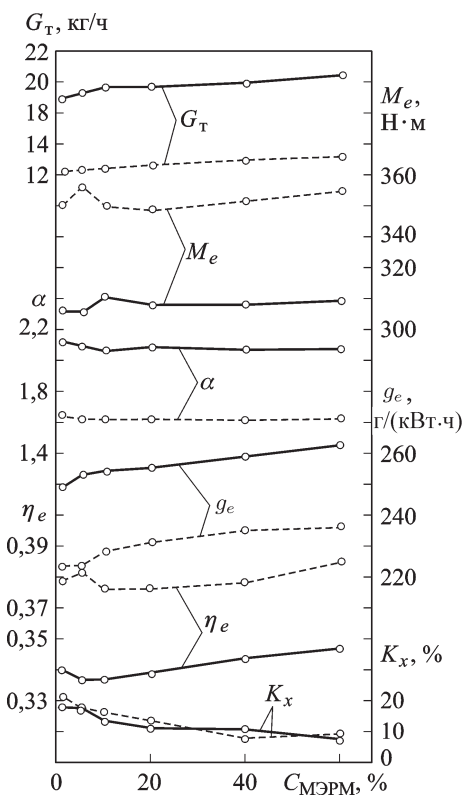
где  $G_{Ti}$  — часовой расход топлива на  $i$ -м режиме. Поскольку смесевые биотоплива имеют меньшую теплотворную способность, топливную экономичность дизеля при его работе на этих топливах целесообразно оценивать не удельным эффективным расходом топлива  $g_e$ , а эффективным КПД дизеля  $\eta_e$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

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

Результаты расчетов по представленным формулам приведены в табл. 3. Они подтверждают возможность заметного снижения дымности ОГ  $K_x$ , а также удельных массовых выбросов оксидов азота ( $e_{\text{NO}_x}$ ) и монооксида углерода ( $e_{\text{CO}}$ ) при переводе исследуемого дизеля с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ.

## Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на различных топливах

Показатели дизеля	Объемная концентрация МЭРМ в смесевом биотопливе, %					
	0	5	10	20	40	60
Часовой расход топлива на режиме максимальной мощности $G_{T2400}$ , кг/ч	19,13	19,45	19,76	19,76	20,02	20,43
Часовой расход топлива на режиме максимального крутящего момента $G_{T1500}$ , кг/ч	12,30	12,50	12,54	12,68	12,98	13,16
Крутящий момент на режиме максимальной мощности $M_e 2400$ , Н·м	306	306	310	308	308	309
Крутящий момент на режиме максимального крутящего момента $M_e 1500$ , Н·м	351	356	350	349	351	355
Дымность ОГ на режиме максимальной мощности $K_x 2400$ , %	18,0	18,0	13,5	11,0	10,0	7,0
Дымность ОГ на режиме максимального крутящего момента $K_x 1500$ , %	21,0	17,0	16,0	13,0	7,5	8,5
Удельный эффективный расход топлива на режиме максимальной мощности $g_e 2400$ , г/(кВт·ч)	249,2	252,9	253,8	255,3	258,5	262,2
Удельный эффективный расход топлива на режиме максимального крутящего момента $g_e 1500$ , г/(кВт·ч)	223,2	223,7	228,0	230,6	234,7	236,0
Эффективный КПД на режиме максимальной мощности $\eta_e 2400$	0,340	0,337	0,337	0,339	0,343	0,346
Эффективный КПД на режиме максимального крутящего момента $\eta_e 1500$	0,379	0,381	0,376	0,376	0,378	0,384
Условный удельный эффективный расход топлива на режимах 13-ступенчатого цикла $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)	245,76	249,20	253,62	256,54	261,28	265,00
Условный эффективный КПД на режимах 13-ступенчатого цикла $\eta_{e\text{ усл}}$	0,345	0,342	0,338	0,338	0,339	0,342
Интегральный удельный выброс оксидов азота $e_{NO_x}$ , г/(кВт·ч)	7,286	6,894	6,718	6,542	7,441	7,759
Интегральный удельный выброс монооксида углерода $e_{CO}$ , г/(кВт·ч)	2,834	2,234	2,199	2,096	2,021	1,932
Интегральный удельный выброс углеводородов $e_{CH_x}$ , г/(кВт·ч)	0,713	0,626	0,658	0,727	0,692	0,681



**Рис. 4.** Зависимость часового расхода топлива  $G_T$ , эффективного крутящего момента  $M_e$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД двигателя  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_x$  от содержания МЭРМ в смесевом биотопливе  $C_{MЭРМ}$  на режимах внешней скоростной характеристики:

сплошные и штриховые кривые — на режимах максимальной мощности и крутящего момента при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  и  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  соответственно

вызванный меньшей теплотой сгорания МЭРМ. Однако при увеличении  $C_{MЭРМ}$  в диапазоне от 0 до 20% изменение эффективного КПД  $\eta_e$  не превышало 1%, что соотносится с точностью измерения расхода топлива (см. рис. 4). Дальнейший рост  $C_{MЭРМ}$  (до 40 и 60%) сопровождался увеличением  $\eta_e$ , свидетельствующим о повышении эффективности сгорания таких смесевых топлив.

Увеличение концентрации МЭРМ в смесевом топливе  $C_{MЭРМ}$  приводило к значительному снижению дымности ОГ  $K_x$  (см. рис. 4). Так, при росте  $C_{MЭРМ}$  с 0 до 60% дымность  $K_x$  монотонно снижалась: на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — примерно

Приведенные на рис. 1–3 характеристики получены при сравнительных испытаниях дизеля Д-245.12С, работающего на ДТ и на смеси 80% ДТ и 20% МЭРМ. Но определенный интерес представляют аналогичные характеристики, полученные при использовании смесей с другим соотношением указанных компонентов. Такие характеристики определены при испытаниях дизеля Д-245.12С на смесях ДТ с МЭРМ с содержанием последнего в смеси 0, 5, 10, 20, 40 и 60% (указано объемное процентное содержание МЭРМ в смеси). Некоторые физико-химические свойства указанных смесей ранее приведены в табл. 2.

Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 4, 5 и в табл. 3. Увеличение содержания МЭРМ в смесевом биотопливе  $C_{MЭРМ}$  от 0 до 60% приводит к некоторому росту часового расхода топлива  $G_T$ , но из-за меньшей теплоты сгорания крутящий момент дизеля  $M_e$  при этом изменяется незначительно (см. рис. 4).

При повышении содержания МЭРМ в смесевом биотопливе  $C_{MЭРМ}$  отмечен рост удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , вызванный

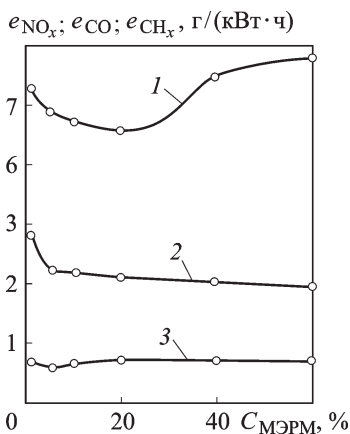
в 2,6 раза (с 18 до 7% по шкале Хартриджа), на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  — в 2,5 раза (с 21 до 8,5%), на режиме минимальной частоты вращения с  $n = 1080 \text{ мин}^{-1}$  — в 2 раза (с 36 до 18%). Такое снижение дымности ОГ обусловлено наличием в составе МЭРМ атомов кислорода, участвующего в процессе окисления углеводов топлива.

Использование смесевых топлив с исследуемыми составами компонентов оказывает заметное влияние на выбросы с ОГ  $\text{NO}_x$  и CO (см. рис. 5). При увеличении содержания МЭРМ  $C_{\text{МЭРМ}}$  в смесевом топливе с 0 до 20% удельные массовые выбросы оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  снизились с 7,286 до 6,542 г/(кВт·ч), т.е. на 10,2%, а при дальнейшем увеличении  $C_{\text{МЭРМ}}$  до 40 и 60% отмечен некоторый рост  $e_{\text{NO}_x}$  до значений (соответственно до 7,441 и 7,759 г/(кВт·ч)), превышающих эти выбросы при работе на ДТ (7,286 г/(кВт·ч)). Это объясняется повышением максимальных температур сгорания, вызванным указанным ростом эффективности сгорания смесевых топлив.

При увеличении содержания МЭРМ в смесевом топливе с 0 до 60% отмечено монотонное снижение  $e_{\text{CO}}$  с 2,834 до 1,932 г/(кВт·ч), т.е. почти в 1,5 раза (см. рис. 5).

Зависимость удельных массовых выбросов несгоревших углеводов  $\text{CH}_x$  от содержания МЭРМ в смесевом топливе имеет более сложный характер (см. рис. 5). При увеличении  $C_{\text{МЭРМ}}$  с 0 до 5% удельный выброс  $e_{\text{CH}_x}$  уменьшился с 0,713 до 0,626 г/(кВт·ч), т.е. на 12,2%, а при дальнейшем увеличении  $C_{\text{МЭРМ}}$  до 20% выброс  $e_{\text{CH}_x}$  возрос до 0,727 г/(кВт·ч), т.е. практически до исходного значения  $e_{\text{CH}_x} = 0,713 \text{ г/(кВт·ч)}$ . С ростом  $C_{\text{МЭРМ}}$  до 40 и 60% выброс  $e_{\text{CH}_x}$  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 несгоревших углеводов незначительно.

Выброс твердых частиц с ОГ при экспериментальных исследованиях дизеля Д-245.12С не определяли из-за отсутствия необходимой измерительной аппаратуры. Однако известно, что основным компонентом твердых частиц является сажа. Поэтому можно предположить, что отмеченное при испытаниях заметное снижение дымности ОГ  $K_x$



**Рис. 5.** Зависимость удельных массовых выбросов оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  (1), монооксида углерода  $e_{\text{CO}}$  (2) и несгоревших углеводов  $e_{\text{CH}_x}$  (3) от содержания МЭРМ в смесевом биотопливе  $C_{\text{МЭРМ}}$  на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла

(в 2,0–2,6 раза) при добавлении МЭРМ в ДТ позволит заметно сократить и выбросы твердых частиц с ОГ.

Проведенный комплекс экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С показал возможность значительного улучшения показателей дизеля при его работе на смесях ДТ и МЭРМ. Даже незначительная добавка МЭРМ в дизельное топливо (5 или 10 %) позволяет заметно улучшить показатели токсичности ОГ дизеля практически без внесения в его конструкцию каких-либо изменений. Поэтому с учетом регулярного ужесточения требований к токсичности ОГ автомобильных дизелей перспектива использования МЭРМ в качестве кислород-содержащей присадки к ДТ становится более чем реальной.

*Статья подготовлена по результатам НИР, выполняемой в рамках реализации Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы.”*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н о в и к о в Л. А. Технологии снижения вредных выбросов тепловозов // Двигателестроение. – 1997. – № 1–2. – С. 49–51.
2. Л ь о т к о В., Л у к а н и н В. Н., Х а ч и я н А. С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. – 311 с.
3. Р а б о т а дизелей на нетрадиционных топливах: Учеб. пособ. / В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов и др. – М.: Изд-во “Легион-Автодата”, 2008. – 464 с.
4. Д е в я н и н С. Н., М а р к о в В. А., С е м е н о в В. Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – М.: ИЦ ФГОУ ВПО “МГАУ им. В.П. Горячкина”, 2008. – 340 с.
5. Z e h n prozent biokraftstoff fur alle // Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Nachrichten. – 2005. – Jg. 59. – No. 47. – 8 s.
6. В r a u n F. Biodiesel: Ein Nutzer Erzahlt // KFZ Anzeiger. – 1996. – Jg. 49. – No. 2. – S. 12–15.
7. R o e k e r G. G. Rapsol-Methyl-Ester eignet sich als Ernanzung zu Dieselmkraftstoff // Maschinenmarkt. – 1995. – Jg. 101. – No. 1/2. – S. 22–24.
8. С м а й л и с В., С е н ч и л а В., Б е р е й ш е н е К. Моторные испытания РМЭ на высокооборотном дизеле воздушного охлаждения // Двигателестроение. – 2005. – № 4. – С. 45–49.

Статья поступила в редакцию 18.12.2009



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.

Алексей Юрьевич Шустер родился в 1984 г., окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 4 научных работ в области математического моделирования рабочих процессов дизелей и их адаптации к работе на альтернативных топливах.

A.Yu. Shuster (b. 1984) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Post-graduate of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of mathematical simulation of working processes of diesel and their adaptation to work 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.

