

**В. А. Марков, А. А. Зенин – Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана**
**С. Н. Девянин – Московский государственный агроинженерный
университет им. В. П. Горячкина**

Работа транспортного дизеля на смеси дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла

IN BRIEF

**Transport diesel
engine operation on the
mixture of diesel fuel
and rapeseed methyl
ester (RME).**

*Mixing RME with
diesel fuel has a
significant influence
on the heat value,
oxygen and sulfur
content and fraction
composition of the
fuel mixture.*

*The application of
the fuel with 60 %
RME content doesn't
impair D-245.12C
engine output. As for
full-load curve the
increase of RME
content up to 60 %
decreases smoking
at the exhaust 2.5-3
times. RME content
up to 60 % also
allows decreasing CO
emissions by 30 %.*

*Besides to minimize
NO_x and CH_x
emissions it is
necessary to optimize
the content of
biofuel mixture.*

*The increase of
RME concentration in
biofuel mixture under
no-load conditions
provides the decrease
of toxic gaseous
components emission.*

Одной из актуальных проблем современного двигателестроения является поиск моторных топлив, которые смогут успешно заменить традиционные бензин и дизельное топливо. Это обусловлено прежде всего постепенным истощением нефтяных месторождений. По пессимистичным прогнозам организации стран – экспортеров нефти (ОПЕК), запасы нефти в промышленно развитых странах иссякнут уже в ближайшем будущем: в США – к 2010 г., в Китае – к 2020 г., в России – к 2021 г. [1].

В последние годы повышенный интерес проявляется к топливу, получаемому из возобновляемых ресурсов растительного происхождения, сырьевые запасы которых практически неисчерпаемы [2,3]. В первую очередь, это биотопливо, производимое из растительных масел, стоимость которого соизмерима (или даже ниже) с ценой нефтяного топлива. Применительно к условиям европейской части России наибольшую перспективу имеет топливо на основе рапсового масла. Рапс не только отличается неплохой урожайностью, но и является желательной культурой для улучшения севооборота. Получаемый при отжиме растительных масел жмых (шрот) является ценным белковым продуктом, который может использоваться для откорма крупного рогатого скота. С одного гектара посевов рапса можно получить до 3 тонн маслосемян (около 1 т рапсового масла), до 3,5 т соломы и 2 т жмыха.

Использование топлива на основе рапсового масла позволит не только заменить нефтяные моторные топлива альтернативными, но и улучшить показатели токсичности отработавших газов [4, 5]. При работе дизельных двигателей на биотопливе снижается уровень эмиссии токсичных компонентов – прежде всего, несгоревших углеводородов (в 1,5-2 раза). Кроме того, использование топлива растительного происхождения обеспечивает кругооборот

углекислого газа в атмосфере, поскольку при его сжигании в двигателях внутреннего сгорания в атмосферу выбрасывается примерно столько углекислого газа, сколько поглощается в процессе выращивания сырья для производства биотоплива. Это приводит к уменьшению выброса в атмосферу парниковых газов и предотвращению парникового эффекта [6].

Следует также отметить, что по своим физико-химическим свойствам биотопливо ближе к дизельному топливу, чем к бензину: оно имеет сравнительно высокую плотность и вязкость, низкую испаряемость. Поэтому его использование возможно лишь в дизельных двигателях, отличающихся меньшей чувствительностью к свойствам применяемого топлива. К тому же, двигатели, работающие с большой степенью сжатия и повышенными значениями коэффициента избытка воздуха, характеризуются лучшими показателями топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ).

Применение растительных масел в чистом виде в качестве топлива ограничено в связи с повышенным нагарообразованием – отложением кокса на распылителях форсунок и других деталях камеры сгорания (КС), а также с их повышенной вязкостью по сравнению со стандартным дизельным топливом. Поэтому масло применяется либо в смеси с дизельным топливом, либо в виде метилового эфира растительного (в частности рапсового) масла.

Метилловый эфир рапсового масла широко применяется в составе топлива для дизелей в странах Западной Европы. Обычно он используется в качестве добавки (5-10 %) к дизельному топливу. В Германии такое топливо выпускают 12 централизованных и 80 нецентрализованных заводов, оно отпускается более чем на 800 заправокных станциях [3]. В Австрии биодизельное топливо уже сейчас составляет 3 % общего рынка дизельного топлива при наличии производственных мощ-

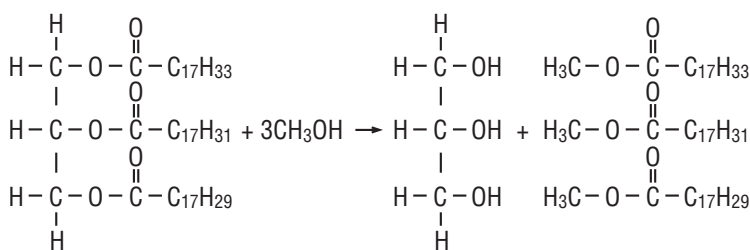
ностей до 30 тыс. тонн в год. В Бельгии эти мощности составляют 400 тыс. т в год, в Германии – 203 тыс., в Италии – 441 тыс., во Франции – 370 тыс. т. В целом, потребление биодизельного топлива в транспортном секторе Европы в 2005 г. составило 3,2 млн т, а в 2010 г., согласно предписанию ЕС-25, должно достичь 10,2 млн т в год [7].

Растительные масла состоят главным образом (на 95-97 %) из триацилглицеринов – органических соединений, сложных полных эфиров глицерина, а также моно- и диацилглицеринов. Ацилглицерины, в свою очередь, содержат в своем составе молекулы различных жирных кислот, связанных с молекулой глицерина $C_3H_5(OH)_3$ [1].

По своей химической структуре молекулы жирных кислот отличаются друг от друга только содержанием атомов углерода и уровнем насыщения жирной кислоты, поэтому свойства растительных масел определяются в основном содержанием и составом жирных кислот, образующих триацилглицерины [8]. Обычно это насыщенные и ненасыщенные (с одной – тремя двойными связями) жирные кислоты с четным числом атомов углерода (преимущественно C_{16} и C_{18}). Кроме того, в растительных маслах в небольшом количестве присутствуют жирные кислоты с нечетным числом атомов углерода (от C_{15} до C_{23}).

Рапсовое масло является типичным представителем растительных масел. Ацилглицерины рапсового масла среднего состава содержат как насыщенные жирные кислоты (3-6 %) – миристиновую (до 1,5 %), пальмитиновую (до 5 %), стеариновую (1-2 %), арахиновую (до 1,8 %); так и ненасыщенные кислоты – олеиновую (15-40 %), линолеовую (10-20 %), линоленовую (2-10 %), эйкозеновую (до 5 %), эруковую (15-65 %) [1].

Как отмечено выше, растительные масла отличаются высокой вязкостью, на порядок превышающей вязкость дизельного топлива. Значительное снижение вязкости биотоплива достигается при получении из растительных масел их сложных метиловых или этиловых эфиров. Метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ) получают в результате прямой этерификации жирных кислот рапсового масла с метиловым спиртом (метанолом) при температуре 80...90 °С в присутствии катализатора – гидроксида калия (едкого калия КОН). При этерификации из 1040 кг рапсового масла, 144 кг метанола и 19 кг гидроксида калия получают 1 т МЭРМ и около 200 кг глицерина [1]. Реакция этерификации рапсового масла метиловым спиртом имеет следующий механизм [8]:



1 молекула ацилглицерина + 3 молекулы метанола → 1 молекула глицерина + 3 молекулы метиловых эфирных жирных кислот рапсового масла

Следует отметить, что МЭРМ и дизельное топливо хорошо смешиваются в любых пропорциях и образуют стабильные смеси, свойства которых несколько отличаются от свойств дизельного топлива. В табл. 1 приведены некоторые физико-химические свойства товарного дизельного топлива, МЭРМ и смесей этих двух видов топлива с различным составом.

Влияние состава таких видов топлива на показатели транспортного двигателя изучалось на дизеле Д-245.12С (4ЧН 11 / 12,5) про-

Табл. 1. Физико-химические свойства исследуемых смесей топлива

Физико-химические свойства	Топливо						
	ДТ	95 % ДТ + 5 % МЭРМ	90 % ДТ + 10 % МЭРМ	80 % ДТ + 20 % МЭРМ	60 % ДТ + 40 % МЭРМ	40 % ДТ + 60 % МЭРМ	МЭРМ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	832	835	839	848	858	877
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,80	3,94	4,09	4,41	5,20	6,00	8,00
Теплотворная способность, низшая, МДж/кг	42,50	42,27	42,03	41,56	40,62	39,68	37,80
Цетановое число	45	-	-	-	-	-	48
Температура самовоспламенения, °С	250	-	-	-	-	-	230
Стехиометрическое соотношение по воздуху	1:14,30	1:14,24	1:14,16	1:13,98	1:13,63	1:13,26	1:12,6
Содержание С	87,0	86,5	86,1	85,1	83,2	81,3	77,5
Н	12,6	12,6	12,5	12,5	12,4	12,2	12,0
О, % по массе	0,4	0,9	1,4	2,4	4,4	6,5	10,5
Общее содержание серы, % по массе	0,20	0,19	0,18	0,16	0,12	0,08	0,002
Коксуемость 10 %-го остатка, % по массе	0,2	-	-	-	-	-	0,3

Рис. 1. Зависимость часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e и коэффициента избытка воздуха α от $C_{MЗРМ}$ при работе дизеля на режимах внешней скоростной характеристики:
 1 – на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹;
 2 – на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹

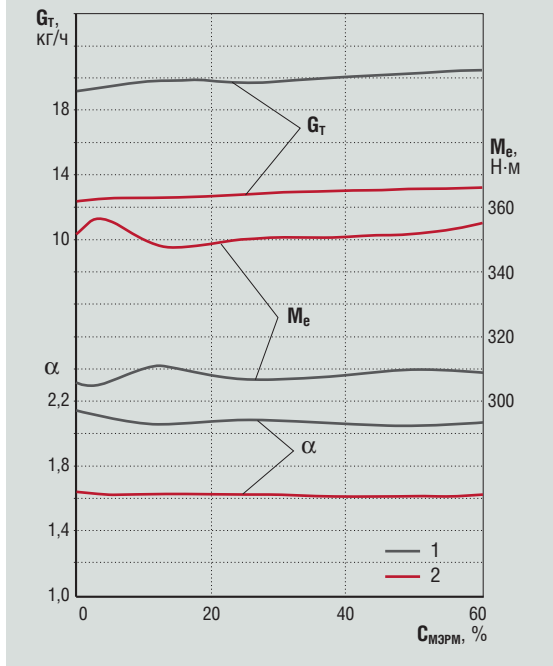
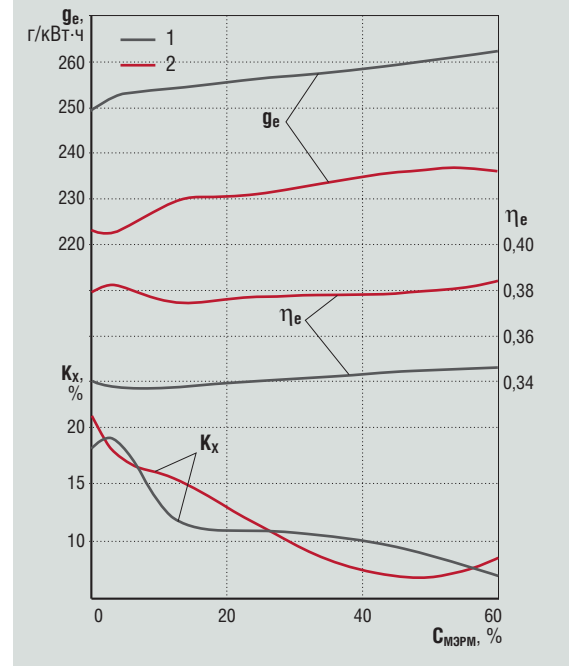


Рис. 2. Зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_x от $C_{MЗРМ}$ при работе дизеля на режимах внешней скоростной характеристики:
 1 – на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹;
 2 – на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹



изводства Минского моторного завода (устанавливается на малотоннажный грузовой автомобиль ЗиЛ-5301). В двигателе, имеющем полуразделенную камеру сгорания типа ЦНИ-ДИ, организовано объемно-пленочное (пристеночное) смесеобразование. Дизель был оснащен турбокомпрессором ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов и топливным насосом высокого давления модели РР4М10U1f (Motorpal, Чехия) с диаметром плунжеров 10 мм и ходом 10 мм. Форсунки с распылителями DOP 119S534, имеющими пять распыляющих отверстий диаметром 0,34 мм, были отрегулированы на начальное давление впрыска топлива 21,5 МПа. Установочный угол опережения впрыска составлял $\theta=13^\circ$ до верхней

мертвой точки. При проведении испытаний регулировочные и установочные параметры оставались неизменными.

Исследования проводились на моторном стенде АМО «ЗиЛ», оборудованном необходимой измерительной аппаратурой. Дымность отработавших газов измерялась с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью измерения 1%. Концентрации в ОГ оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO и несгоревших углеводородов CH_x определялись газоанализатором SAE-7532 японской фирмы Yapanco (погрешность измерения $\pm 1\%$). Испытания дизеля проводились на режимах внешней скоростной характеристики и 13-ступенчатого

Табл. 2. Результаты испытаний дизеля Д-245.12С, работающего на различных смесях топлива

Параметры	Объемная концентрация МЗРМ в смеси топлива, %					
	0	5	10	20	40	60
Часовой расход топлива на режимах максимальной мощности, G_{T2400} / максимального крутящего момента, G_{T1500} , кг/ч	19,13/12,30	19,45/12,50	19,76/12,54	19,76/12,68	20,02/12,98	20,43/13,16
Крутящий момент на режимах максимальной мощности, M_{e2400} / максимального крутящего момента, M_{e1500} , Н·м	306/351	306/356	310/350	308/349	308/351	309/355
Коэффициент избытка воздуха на режимах максимальной мощности, α_{2400} / максимального крутящего момента, α_{1500}	2,13/1,64	2,09/1,26	2,06/1,62	2,08/1,62	2,06/1,61	2,07/1,62
Удельный эффективный расход топлива на режимах максимальной мощности, g_{e2400} / максимального крутящего момента, g_{e1500} , г/кВт·ч	249,2/223,2	252,9/223,7	253,8/228,0	255,3/230,6	258,5/234,7	262,2/236,0
Эффективный КПД на режимах максимальной мощности, η_{e2400} / максимального крутящего момента, η_{e1500}	0,340/0,379	0,337/0,381	0,337/0,376	0,339/0,376	0,343/0,378	0,346/0,384
Дымность ОГ на режимах максимальной мощности, K_{x2400} / максимального крутящего момента, K_{x1500} , %	18,0/21,0	18,0/17,0	13,5/16,5	11,0/13,0	10,0/7,5	7,0/8,5
Дымность ОГ на режиме минимальной частоты вращения, K_{x1080} , %	36,0	24,0	22,5	25,0	22,0	18,0
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

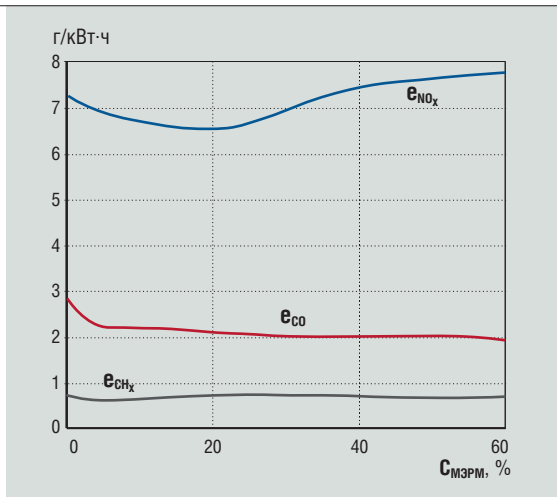


Рис. 3. Зависимости удельных массовых выбросов e_{NO_x} , e_{CO} и e_{CH_x} от содержания в смеси биотопливе МЭРМ при работе дизеля на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла

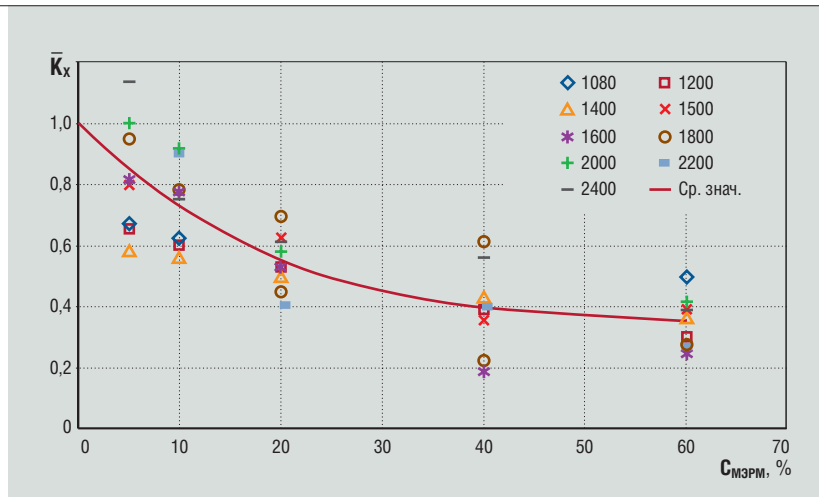


Рис. 4. Зависимость относительной дымности K_x от содержания в смеси биотопливе МЭРМ при работе дизеля на режимах внешней скоростной характеристики с $n=1080, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000, 2200$ и 2400 мин⁻¹; сплошной линией показаны средние значения K_x

испытательного цикла ECE R49 для оценки токсичности ОГ в стендовых условиях.

Некоторые результаты испытаний дизеля Д-245.12С, работающего на режимах внешней скоростной характеристики на дизельном топливе (ДТ) и смесях ДТ и МЭРМ с объемным содержанием эфира от 5 до 60 %, представлены в табл. 2 и на рис. 1 и 2.

Следует отметить, что физические свойства исследуемых смесей топлива (плотность, вязкость, сжимаемость, поверхностное натяжение) незначительно отличаются от аналогичных свойств стандартного ДТ. Поэтому подача их в КС двигателя может осуществляться штатной системой топливоподачи дизеля Д-245.12С с показателями этого процесса, характерного для дизельного топлива. Так, представленные на рис. 1 характеристики часового расхода топлива G_T дизеля, работающего на максимальной мощности при частоте вращения коленчатого вала $n=2400$ мин⁻¹ и на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹, слабо изменяются с увеличением содержания МЭРМ в топливе ($C_{MЭРМ}$). При этом незначительно изменяются коэффициент избытка воздуха α и крутящий момент двигателя M_e (см. рис. 1 и табл. 2).

Наличие в молекулах МЭРМ значительного количества кислорода (до 12 %) приводит к снижению теплотворной способности топлива (нижней теплоты сгорания H_U , см. табл. 1). В результате удельный эффективный расход топлива g_e дизеля увеличивается.

Так, при переводе Д-245.12С с дизельного топлива на биотопливо с содержанием МЭРМ 60 % удельный расход топлива на максимальной мощности возрастает с 249,2 до 262,2 г/кВт·ч, а на режиме максимального крутящего момента – с 223,2 до 236 г/кВт·ч (см. рис. 2 и табл. 2). Но при этом эффектив-

ный КПД двигателя η_e изменяется незначительно: с 0,340 до 0,346 на максимальной мощности и с 0,379 до 0,384 на режиме максимального крутящего момента.

Наличие кислорода в МЭРМ благоприятно сказывается и на дымности K_x отработавших газов: на максимальной мощности она снижается с 18 до 7 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента – с 21,0 до 8,5 % (см. рис. 2 и табл. 2). Аналогичная тенденция отмечена и на других режимах внешней скоростной характеристики.

При экспериментальных исследованиях дизеля на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла кроме основных параметров двигателя определялись концентрации в ОГ основных нормируемых токсичных компонентов – NO_x , CO и CH_x . По экспериментально определенным значениям их концентраций (соответственно C_{NO_x} , C_{CO} , C_{CH_x}) согласно общепринятой методике [4, 5] рассчитаны интегральные удельные массовые выбросы: e_{NO_x} , e_{CO} , e_{CH_x} . Результаты этих расчетов представлены на рис. 3 и в табл. 2. Они показывают, что с увеличением содержания МЭРМ в биотопливе выбросы оксидов азота в отработавших газах сначала снижаются: с 7,286 г/кВт·ч при $C_{MЭРМ}=0$ % до 6,542 г/кВт·ч при $C_{MЭРМ}=20$ %, а при дальнейшем увеличении доли МЭРМ (60 %) – повышаются до 7,759 г/кВт·ч.

Присутствие в молекулах МЭРМ атомов кислорода благоприятно сказывается на выбросах CO , эмиссия которого снижается во всем исследуемом диапазоне изменения содержания метилового эфира в топливе (см. рис. 3 и табл. 2). При увеличении $C_{MЭРМ}$ с 0 до 60 % выбросы монооксида углерода снижаются с 2,834 до 1,932 г/кВт·ч, т.е. на 31,8 %. Зависимость выбросов несгоревших углеводо-



Рис. 5. Зависимость относительной концентрации в ОГ оксидов азота C_{NO_x} (а), монооксида углерода C_{CO} (б), несгоревших углеводородов C_{CH_x} (в) от содержания в смесевом биотопливе метилового эфира рапсового масла $C_{MЭРМ}$ при работе дизеля на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла с частотой вращения $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ и $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ и различной нагрузкой (10, 25, 50, 75 и 100 %); сплошной линией показаны средние значения токсичных компонентов

родов e_{CH_x} от содержания МЭРМ имеет достаточно сложный характер. При увеличении $C_{MЭРМ}$ от 0 до 5 % выбросы углеводородов снижаются с 0,713 до 0,626 г/кВт.ч, при дальнейшем увеличении до 20 % достигают своего максимума – 0,727 г/кВт.ч, но затем при увеличении до 60 % снова снижаются до 0,681 г/кВт.ч (см. рис. 3 и табл. 2).

Представленные данные свидетельствуют о том, что показатели дымности и токсичности отработавших газов дизеля Д-245.12С, работающего на смесях ДТ и МЭРМ различного состава, находятся в сложной, противоречивой зависимости. Достижение наилучших показателей токсичности отработавших газов достигается путем оптимизации состава такого биотоплива. Еще лучшие результаты могут быть получены при регулировании его состава в соответствии с режимом работы дизеля.

Представленные на рис. 4 данные по дымности K_x на режимах внешней скоростной характеристики показывают, что с увеличением содержания МЭРМ в биотопливе зависимость K_x от частоты вращения становится менее выраженной. С увеличением $C_{MЭРМ}$ с 0 до 60 % отмечается снижение дымности ОГ в среднем на 64 %. При этом использование смесового биотоплива для снижения дымности наиболее эффективно на режимах с низкими и средними частотами вращения (при $n < 1800 \text{ мин}^{-1}$).

Данные рис. 5а по содержанию в ОГ оксидов азота C_{NO_x} подтверждают, что наибольшая эмиссия наблюдается на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла с полной нагрузкой, а наименьшая – при минимальной нагрузке. Наиболее неблагоприятна частота вращения 1500 мин^{-1} , соответствующая режиму максимального крутящего момента, отличающемуся максимальной температурой горения. С увеличением доли МЭРМ в смесевом биотопливе концентрация NO_x сначала снижается, а затем увеличивается и при $C_{MЭРМ} = 60 \%$ достигает своего максимума. Эта тенденция характерна для обоих исследованных скоростных режимов при $n=1500$ и 2400 мин^{-1} .

Тенденция значительного снижения концентрации углерода C_{CO} при увеличении содержания МЭРМ также характерна для обоих исследованных скоростных режимов 13-ступенчатого цикла при $n=1500$ и 2400 мин^{-1} (рис. 5б). Увеличение $C_{MЭРМ}$ с 0 до 60 % на режимах с частотой вращения 1500 мин^{-1} сопровождается снижением концентрации C_{CO} в среднем на 25 %, а на режимах с $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ – на 30 %. При этом на режимах с $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ максимальные концентрации C_{CO} в ОГ дизеля отмечены при работе с 50 %-й нагрузкой, а на режимах с $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ – с 10 %-й нагрузкой.

Как отмечено выше, показатели эмиссии углеводородов C_{CH_x} имеют достаточно сложную зависимость (рис. 5в). На режимах 13-ступенчатого цикла с частотой вращения 1500 мин^{-1} при увеличении содержания МЭРМ концентрация CH_x в отработавших газах сначала снижается, достигая своего минимума при $C_{MЭРМ}=5-10 \%$, а затем увеличивается и

при 60 % достигает максимума. На режимах с $n=2400$ мин⁻¹ во всем диапазоне увеличения $C_{MЭPM}$ с 0 до 60 % концентрация углеводородов не превышает той, которая характерна для работы исследуемого двигателя на чистом дизельном топливе (при $C_{MЭPM}=0$ %). На режимах с $n=1500$ мин⁻¹ максимальные концентрации C_{CH_x} в ОГ отмечены при работе с 75 %-й нагрузкой, а на режимах с $n=2400$ мин⁻¹ минимальные концентрации C_{CH_x} наблюдаются при 25 %-й нагрузке.

Характеристики концентраций C_{NO_x} , C_{CO} , C_{CH_x} на режиме холостого хода дизеля при $n=850$ мин⁻¹ представлены на рис. 6. Как видно, при увеличении содержания МЭРМ в смеси биотоплива от 0 до 60 % концентрации данных компонентов не превышают значений, характерных для работы на чистом дизельном топливе (при $C_{MЭPM}=0$ %). При этом в указанном диапазоне изменения $C_{MЭPM}$ снижение C_{NO_x} в отработавших газах составило 15 %, C_{CO} – 22 %, C_{CH_x} – 5 %.

В целом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о целесообразности регулирования состава смеси биотоплива в соответствии с режимом работы исследуемого дизеля. Для определения характеристик такого регулирования необходимо использовать методы многопараметрической оптимизации, предусматривающие комплексную минимизацию показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов.

Полученные при проведении экспериментальных и расчетных исследований результаты могут быть сведены к следующим основным выводам:

- добавление МЭРМ в дизельное топливо заметно влияет на теплотворную способность, содержание кислорода и серы, а также на фракционный состав смеси биотоплива;
- применение смеси биотоплива с содержанием МЭРМ до 60 % практически не ухудшает мощностных показателей дизеля Д-245.12С и не требует дополнительного регулирования системы топливоподачи;
- на режимах максимального крутящего момента и максимальной мощности удельный эффективный расход смеси биотоплива увеличивается, по сравнению с работой на ДТ, за счет меньшей теплотворной способности. При этом эффективный КПД двигателя изменяется незначительно;
- на режимах внешней скоростной характеристики увеличение концентрации МЭРМ в смеси биотоплива до 60 % позволяет снизить дымность отработавших газов исследуемого дизеля в 2,5-3 раза;

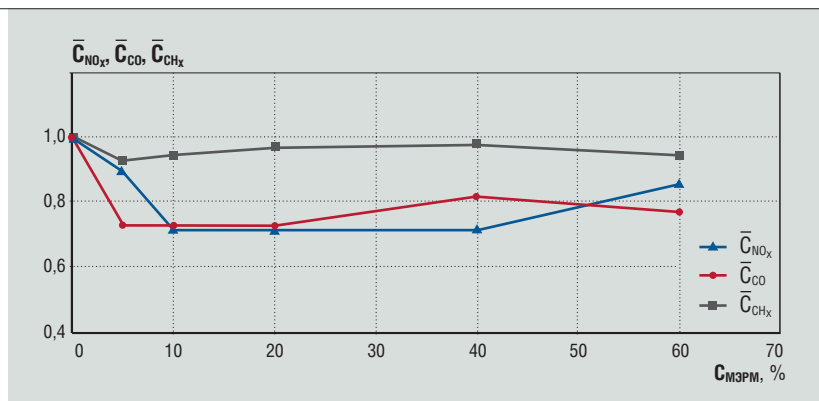


Рис. 6. Зависимость относительных концентраций в ОГ оксидов азота C_{NO_x} , монооксида углерода C_{CO} , несгоревших углеводородов C_{CH_x} от содержания в смеси биотоплива $C_{MЭPM}$ при работе дизеля на режиме холостого хода с $n=850$ мин⁻¹

- на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла увеличение концентрации МЭРМ до 60 % позволяет снизить удельный массовый выброс CO примерно на 30 %. При этом для минимизации выбросов NO_x и CH_x необходима оптимизация состава смеси биотоплива;
- при увеличении концентрации МЭРМ в смеси биотоплива на режиме холостого хода 13-ступенчатого испытательного цикла выбросы всех нормируемых газообразных токсичных компонентов снижаются. ■

Использованная литература

1. Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – Харьков: Изд-во «Новое слово», 2007. – 452 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. Кириллов Н.Г. Альтернативные моторные топлива XXI века // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2003, № 3. С. 58-63.
4. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. Учебник для вузов. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. – 344 с.
5. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.
6. Кульчицкий А.Р., Эфрос В.В. Транспорт и парниковые газы // Автомобильная промышленность. 2005, № 6. С. 5-8.
7. Смайлис В., Сенчила В., Берейшене К. Моторные испытания РМЭ на высокооборотном дизеле воздушного охлаждения // Двигателестроение. 2005, № 4. С. 45-49.
8. Химия жиров / Б.Н. Тютюнников, З.И. Бухштаб, Ф.Ф. Гладкий и др. – М.: Колос, 1992. – 448 с.