

УДК 620.22, 621.436, 665.334

Горчичное масло как добавка к дизельному топливу

Марков В.А., Лобода С.С., Са Бовэнь

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Зыков С.А.

РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия

Mustard Oil as an Additive to Diesel Fuel

Markov V.A., Loboda S.S., Sa Bowen

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman

Zykov S.A.

RGAU-MSKhA named after K.A. Timiryazev, Russia

Показаны преимущества использования топлив растительного происхождения в качестве моторных топлив. Одним из распространенных в России растительных масел является горчичное масло. Рассмотрены возможные пути использования горчичного масла в качестве топлива для дизеля. Проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С, работающего на смесях дизельного топлива и горчичного масла различного состава. Подтверждена возможность улучшения показателей токсичности отработавших газов при использовании этих смесей в качестве топлива для автомобильных дизелей.

Advantages of using fuels of vegetable origin as motor fuels are shown. Experimental research of diesel engine D-245.12S functioning on mixtures of diesel fuel and mustard oil of various percentage is given. One of the most wide spread vegetable oils in Russia is mustard oil. Possible ways of using mustard oil as fuel for a diesel engine are considered. An opportunity of improving characteristics of exhaust gases toxicity by using these mixtures as a fuel for automobile diesel engines is demonstrated.

Ключевые слова: дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, альтернативное топливо, растительное масло, рапсовое масло, горчичное масло, смесевое биотопливо

Key words: diesel engine, petroleum diesel fuel, alternative fuel, vegetable oil, rapeseed oil, mustard oil, biofuel mixture

ВВЕДЕНИЕ

Альтернативные моторные топлива находят все большее применение на транспорте и в других областях экономики [1]. Необходимость широкого использования альтернативных топлив обусловлена истощением мировых запасов нефти, нарастающим дефицитом нефтепродуктов и повышением цен на нефтяные моторные топлива. Другой причиной интенсивных поисков альтернативных энергоносителей для транспорта являются ужесточающиеся требования к токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей [2]. Среди альтернативных моторных топлив наиболее привлекательными представляются топлива, получаемые из возобновляемых сырьевых ресурсов, – биотоплива растительного происхождения. Переход от энергетики, базирующейся на ископаемых ресурсах, к энергетике, потребляющей возобновляемое сырье, является одним из основных направлений развития современной экономики.

СМЕСИ НЕФТЯНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ГОРЧИЧНЫМ МАСЛОМ КАК МОТОРНЫЕ ТОПЛИВА

Применительно к дизелям автотракторного типа в качестве перспективных энергоносителей рассматриваются топлива, производимые из растительных масел [3, 4]. Это объясняется простотой и экологичностью процесса получения растительных масел, их сравнительно невысокой стоимостью и приемлемой воспламеняемостью в условиях камеры сгорания (КС) дизеля. В

связи с этим возможна работа дизелей на указанных биотопливах без существенных конструкционных изменений двигателей и их систем.

В условиях Российской Федерации с точки зрения применения в качестве моторных топлив наиболее значимы такие виды масел, как рапсовое, подсолнечное, соевое, кукурузное, горчичное. При этом следует отметить следующую особенность рынка растительных масел в России. Если в мировом производстве масел наиболее значимыми являются пальмовое и соевое масла, то в отечественной масложировой промышленности ведущее место занимают производства подсолнечного (86,84% от всего производства масел), соевого (7,96%), рапсового (4,84%), горчичного (0,11%), кукурузного (0,04%) и льняного (0,03%) растительных масел [5].

Все растительные масла являются горючими и могут быть использованы в качестве моторных топлив. Для этой цели могут быть использованы чистые растительные масла. Основным препятствием подобного применения растительных масел являются высокая вязкость растительных масел и их коксуемость в условиях КС дизеля, что приводит к отложениям кокса на поверхностях КС, в первую очередь – на распылителях форсунок. Из растительных масел получают метиловый, этиловый или бутиловый эфиры, которые имеют существенно меньшую вязкость, и используют их в качестве либо самостоятельных топлив, либо в смесях с нефтяными топливами [3, 4]. В сельской местности, где отсутствует инфраструктура для производства указанных эфиров, наиболее привлекательным способом применения растительных масел в качестве моторного топлива представляется работа дизеля на смесях нефтяного дизельного топлива (ДТ) с растительными маслами с небольшим содержанием последних. Эти два компонента хорошо смешиваются в любых пропорциях, образуя стабильные смеси. При этом растительные масла можно рассматривать как кислородсодержащие присадки (оксигенаты), значительно улучшающие экологические характеристики нефтяных ДТ.

Поскольку горчичное масло является четвертым по значимости растительным маслом в России определенный интерес представляет возможность его использования в качестве моторного топлива для отечественных дизелей. Экспери-

ментальные исследования различных дизелей на топливах, полученных из горчичного масла, уже проведены в России [6, 7] и за рубежом [8, 9, 10]. Однако в этих работах недостаточное внимание уделено показателям токсичности ОГ дизелей. Для оценки возможности использования горчичного масла в качестве экологической добавки к нефтяному ДТ проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) производства Минского моторного завода. Исследовались нефтяное ДТ и его смеси с горчичным маслом, содержащие до 10% ГМ (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические свойства исследуемых топлив

Свойства	Топлива				
	ДТ	РМ	ГМ	Смесь 95 ДТ и 5% ГМ	Смесь 90% ДТ и 10% ГМ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830,0	916,0	920,0	835	839
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,8	75,0	70,0	5,0	7,0
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	33,1	-	-
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42500	37300	37200	42100	41900
Цетановое число	45	36	35	-	-
Температура самовоспламенения, °С	250	318	320	-	-
Температура помутнения, °С	-25	-9	-8	-	-
Температура застывания, °С	-35	-20	-18	-	-
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,31	12,50	12,44	14,19	14,11
Содержание, % по массе					
С	87,0	77,0	77,1	86,5	86,0
Н	12,6	12,0	11,8	12,5	12,5
О	0,4	11,0	11,1	1,0	1,5
Общее содержание серы, % по массе	0,20	0,002	0,002	0,190	0,180

Примечание: «-» – свойства не определялись; для смесей указано объемное процентное содержание компонентов

Дизель исследован на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) и режимах 13-режимного испытательного цикла Правил *ECE R49* ЕЭК ООН с установочным углом опережения впрыскивания топлива (УОВТ) $\theta=13^\circ$ поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки и неизменным положением упора дозирующей рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД). Моторный стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась с помощью дымомера *МК-3* фирмы *Hartridge* (Великобритания) с погрешностью измерения $\pm 1\%$, а концентрации в ОГ оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , легких несго-

Таблица 2. Показатели дизеля типа Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ и его смесях с горчичным маслом

Показатели	Топлива		
	ДТ	Смесь 95% ДТ и 5% ГМ	Смесь 90% ДТ и 10% СМ
Часовой расход топлива G_T , кг/ч:			
- на режиме максимальной мощности	20,00	20,17	20,25
- на режиме максимального крутящего момента	13,00	13,13	13,22
Крутящий момент дизеля M_e , Н·м:			
- на режиме максимальной мощности	321	321	318
- на режиме максимального крутящего момента	364	366	363
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)			
- на режиме максимальной мощности	248,2	250,1	253,4
- на режиме максимального крутящего момента	226,2	228,9	231,9
Эффективный КПД дизеля η_e :			
- на режиме максимальной мощности	0,341	0,341	0,339
- на режиме максимального крутящего момента	0,374	0,373	0,370
Дымность ОГ K_X , % по шкале Хартриджа:			
- на режиме максимальной мощности	17	15	12
- на режиме максимального крутящего момента	42	38	36
Интегральные на режимах 13-режимного цикла эффективные показатели двигателя:			
- эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$, г/(кВт·ч)	244,63	247,17	251,08
- эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	0,346	0,346	0,342
Интегральные на режимах 13-режимного цикла удельные массовые выбросы, г/(кВт·ч):			
- оксидов азота e_{NO_x}	5,911	5,760	5,689
- монооксида углерода e_{CO}	2,184	2,140	2,068
- несгоревших углеводородов $e_{\text{СН}_x}$	0,675	0,602	0,561

Из-за наличия в молекулах ГМ атомов кислорода теплотворная способность смесового биотоплива оказалась несколько ниже теплотворной способности ДТ. Это привело к тому, что при использовании смеси 90% ДТ и 10% ГМ на большинстве исследуемых режимов удельный эффективный расход топлива g_e оказался несколько выше, чем при работе на ДТ. В частности, при переходе с ДТ на указанное смесовое биотопливо на режиме максимальной мощности с частотой вращения коленчатого вала $n=2400$ мин⁻¹ удельный эффективный расход топлива g_e увеличился от 248,2 до 253,4 г/(кВт·ч), а на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ – от 226,2 до 231,9 г/(кВт·ч). Но при этом эффективный КПД дизеля η_e на этих режимах изменился незначительно (см. табл. 2). Наличие в молекулах ГМ атомов кислорода привело к заметному уменьшению дымности ОГ при работе дизеля на исследуемом смесовом биотопливе. Так, на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ переход с ДТ на смесь 90% ДТ и 10% ГМ сопровождался

снижением дымности ОГ K_X от 17 до 12% по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ – от 42 до 36% по шкале Хартриджа (см. рис. 1 и табл. 2).

На втором этапе исследований дизель испытывался на режимах 13-режимного цикла норм *ECE R49* (рис. 2). Как отмечено выше, использование рассматриваемого смесового биотоплива привело к небольшому увеличению часового расхода топлива G_T . Так, при переводе дизеля с ДТ на смесь 90% ДТ и 10% ГМ на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ величина G_T возросла от 20,00 до 20,25 кг/ч, а на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ – от 13,00 до 13,22 кг/ч (см. рис. 2,а и табл. 2).

При использовании смесового биотоплива отмечена тенденция снижения концентрации в ОГ оксидов азота C_{NOx} (см. рис. 2,б). Так, при переводе дизеля с ДТ на смесь 90% ДТ и 10% ГМ на режиме холостого хода при $n=900$ мин⁻¹ концентрации C_{NOx} была одинаковой и равной 0,0100%. На режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ она снизилась от 0,0640 до 0,0625%, а на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ – от 0,0550 до 0,0545%. На большинстве исследованных режимов при использовании смесового биотоплива отмечена тенденция снижения содержания в ОГ монооксида углерода C_{CO} (см. рис. 2,в). На режиме холостого хода при $n=900$ мин⁻¹ перевод дизеля с ДТ на смесь 90% ДТ и 10% ГМ сопровождался уменьшением значения C_{CO} от 0,0400 до 0,0390%, на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ – от 0,0300 до 0,0275%, а на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ – от 0,0100 до 0,0091%. Применение исследуемого смесового биотоплива оказало положительное влияние и на концентрацию в ОГ несгоревших углеводородов C_{CHx} (см. рис. 2,г). На режиме холостого хода при $n=900$ мин⁻¹ отмечено снижение C_{CHx} от 0,0215 до 0,0210%, режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ от 0,0130 до 0,0105%, а на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ – от 0,0076 до 0,0050%.

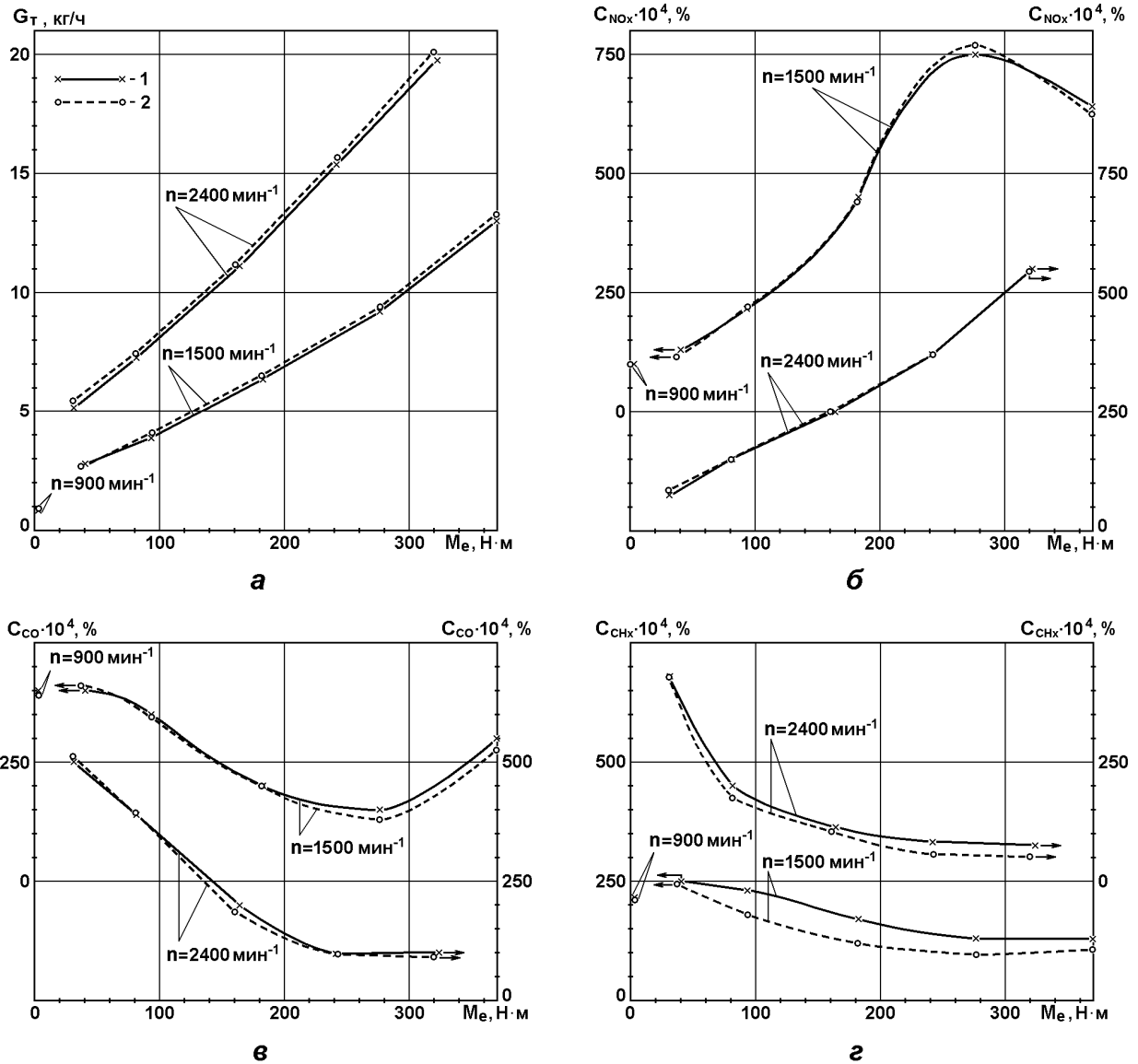


Рис. 2. Зависимость часового расхода топлива G_T (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота C_{NOx} (б), монооксида углерода C_{CO} (в) и несгоревших углеводородов C_{CHx} (г) от частоты вращения n и крутящего момента M_e дизеля типа Д-245.12С: 1 – ДТ; 2 – смесь 90% ДТ и 10% ГМ

По приведенным на рис. 2 характеристикам содержания в ОГ газообразных нормируемых токсичных компонентов с использованием общепринятых методик рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы на режимах 13-режимного цикла *ECE R49* по формулам [3, 4]:

$$e_{NOx} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{NOx i} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}, \quad e_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{CO i} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}, \quad e_{CHx} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{CHx i} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}.$$

Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-режимного цикла проведена по среднему (условному) удельному эффективному расходу топлива $g_{e \text{ усл}}$ и по условному эффективному КПД $\eta_{e \text{ усл}}$, которые определялись с использованием зависимостей [3, 4]:

$$g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{\tau i} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}, \quad \eta_{e \text{ усл}} = \frac{3600}{H_U \cdot g_{e \text{ усл}}},$$

где $G_{\tau i}$ и N_{ei} – часовой расход топлива и эффективная мощность двигателя на i -том режиме; K_i – весовой коэффициент режима (доля времени этого режима); где H_U – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг. Результаты расчетов указанных параметров представлены в табл. 2.

Представленные на рис. 1 и 2 характеристики получены при испытаниях дизеля типа Д-245.12С на ДТ и смеси 90% ДТ и 10% ГМ. Аналогичные характеристики определены и при испытаниях этого дизеля на смеси 95% ДТ и 5% ГМ. По результатам этих исследований определены интегральные на режимах 13-режимного цикла показатели топливной экономичности и удельные массовые выбросы токсичных компонентов ОГ. Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 3 и сведены в табл. 2.

В целом в диапазоне изменение содержания ГМ в смесевом биотопливе $C_{ГМ}$ от 0 до 10% отмечено увеличение удельного эффективного расхода топлива g_e , составившее на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента около 5 г/(кВт·ч), см. рис. 3,б и табл. 2. Однако при этом эффективный КПД дизеля η_e изменялся очень незначительно. В рассматриваемом диапазоне изменения $C_{ГМ}$ отмечено значительное снижение дымности ОГ K_x , составившее на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента соответственно 5 и 6% по шкале Хартриджа (см. рис. 3,б и табл. 2).

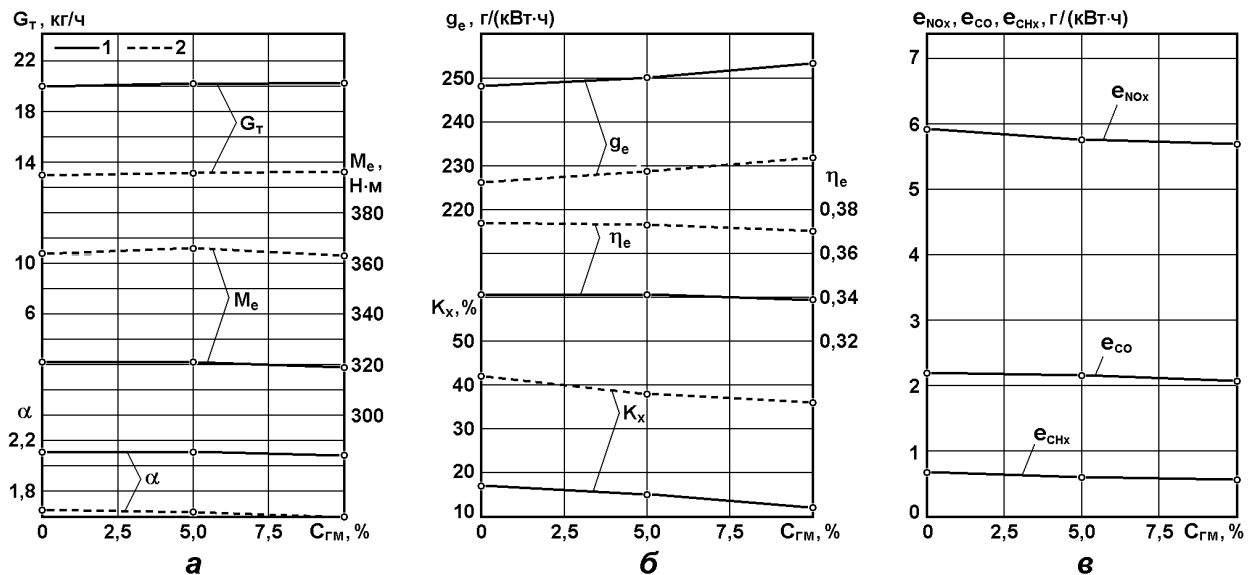


Рис. 3. Зависимость часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e и коэффициента избытка воздуха α на режимах ВСХ (а), удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_x на режимах ВСХ (б) и удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NOx} , монооксида углерода e_{CO} и несгоревших углеводородов e_{CH} с ОГ на 13-режимном цикле (в) дизеля Д-245.12С от содержания ГМ в смесевом биотопливе C_{GM} : 1 – на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹; 2 – на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹

Приведенные на рис. 3,в и в табл. 2 данные подтверждают возможность улучшения экологических показателей дизеля типа Д-245.12С при его переводе с ДТ на смесь 90% ДТ и 10% ГМ. При этом отмечено снижение интегральных на режимах 13-режимного цикла удельных массовых выбросов всех нормируемых токсичных компонентов ОГ. Выброс оксидов азота e_{NOx} уменьшился от 5,911 до 5,689 г/(кВт·ч), монооксида углерода e_{CO} – от 2,184 до 2,068 г/(кВт·ч), несгоревших углеводородов e_{CHX} – от 0,675 до 0,561 г/(кВт·ч). Такое улучшение экологических показателей при использовании смесей ДТ и ГМ получено без изменения конструктивных и регулировочных параметров дизеля. Для достижения еще большего снижения выбросов токсичных компонентов ОГ и улучшения показателей топливной экономичности дизеля при его адаптации к работе на указанных биотопливах необходима

реализация ряда мероприятий. Это – совершенствование конструкции проточной части распылителей форсунок, согласование струй топлива с формой КС, а также уточнение регулировочных параметров дизеля (в первую очередь – значений УОВТ и организация его регулирования при изменении свойств топлива). Целесообразна и оптимизация состава смесей ДТ и ГМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Перспективными альтернативными топливами для дизелей являются топлива, получаемые из растительных масел. Эти топлива вырабатываются из возобновляемого сырья и отличаются хорошими экологическими качествами. Рассмотрена возможность использования в отечественном дизеле смесей нефтяного дизельного топлива с горчичным маслом.

- Подтверждена возможность улучшения показателей токсичности отработавших газов дизеля Д-245.12С при использовании смесей дизельного топлива и горчичного масла в качестве топлива для автомобильных дизелей.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Александров А.А., Архаров И.А., В.В. Багров, Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Девянин С.Н., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания* / Под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. Москва: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. 791 с.

[2] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.

[3] Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М. *Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания*. Москва: НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2016. 292 с.

[4] Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г., Шахов А.В., Багров В.В. *Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях*. Москва: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 536 с.

[5] Година Е.Д. *Определение теплоты сгорания дизельного смесового биотоплива из соевого масла*. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 2013, Том. 10, № 5, с. 25-29.

[6] Уханов А.П., Уханов Д.А., Голубев В.А. *Перспективы использования биотоплива из горчицы*. Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии, 2011, № 1, с. 88-92.

[7] Уханов А.П., Уханов Д.А., Шемелев Д.С. *Дизельное смесовое топливо*. Пенза: РИО Пензенской государственной сельскохозяйственной академии, 2012. 147 с.

[8] Niemi S.A., Illikanen P.E., Laiho V.O.K. *A Tractor Engine Fueled with Mustard Seed Oil: Optimization, Emissions and Practical Experiences*. SAE Technical Paper Series, 1997, № 972724, p. 11-25.

[9] Niemi S.A., Hatonen T., Laiho V.O.K. *Results from a Durability Test of a Mustard Seed Oil Driven Tractor Engine*. SAE Technical Paper Series, 1998, № 982528, p. 1-15.

[10] Niemi S.A., Murtonen T.T., Lauren M.J., Laiho V.O.K. *Exhaust Particulate Emissions of a Mustard Seed Oil Driven Tractor Engine*. SAE Technical Paper Series, 2002, № 2002-01-0866, p. 1-12.