

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.436

DOI 10.18698/0536-1044-2016-7-28-44

Оптимизация состава смесей нефтяного дизельного топлива с растительными маслами

В.А. Марков¹, С.Н. Девянин², С.И. Каськов¹¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² Российский государственный аграрный университет (РГАУ) — МСХА им. К.А. Тимирязева, 127550, Москва, Российская Федерация, Тимирязевская ул., д. 58

Optimization of the Composition of Oil Diesel Fuels with Plant Oils

V.A. Markov¹, S.N. Devyanin², S.I. Kaskov¹¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Russian State Agrarian University (RSAU) — Timiryazev Moscow Agricultural Academy, 127550, Moscow, Russian Federation, Timiryazevskaya St., Bldg. 58

e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru, devta@rambler.ru, kaskov_si@mail.ru



Актуальность статьи обусловлена необходимостью более широкого применения альтернативных моторных топлив и решения обостряющихся экологических проблем. Проанализированы преимущества и проблемы применения в дизелях альтернативных топлив, получаемых из возобновляемого сырья — растительных масел. Использование альтернативных моторных топлив, производимых из растительного сырья, позволяет не только обеспечить замещение нефтяных моторных топлив, но и уменьшить выбросы в атмосферу вредных веществ с отработавшими газами дизелей. Показана целесообразность применения смесевых биотоплив — смесей нефтяного дизельного топлива и растительных масел. Проведено исследование, направленное на оптимизацию состава таких биотоплив. Рассмотрены смеси нефтяного дизельного топлива с рапсовым и подсолнечным маслами. Предложена методика оптимизации состава этих смесей, базирующаяся на определении обобщенного критерия оптимальности, вычисляемого в виде суммы частных критериев, характеризующих концентрацию в отработавших газах оксидов азота и сажи — дымность этих газов. Проведены оптимизационные расчеты состава биотоплива для дизеля типа Д-245.12С. Показано, что с увеличением содержания рапсового и подсолнечного масел в смеси с нефтяным дизельным топливом параметры токсичности отработавших газов дизеля улучшаются, причем даже небольшая добавка растительного масла в нефтяное дизельное топливо значительно улучшает эти параметры в исследуемом дизеле.

Ключевые слова: дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, альтернативное топливо, рапсовое масло, подсолнечное масло, смесевое биотопливо, оптимизация.



This article is necessitated by the need to increase the use of alternative motor fuels to solve the deteriorating environmental issues. The advantages and drawbacks of using alternative

diesel fuels obtained from renewable sources such as plant oils, are analyzed in this article. The use of alternative plant-based motor fuels can not only provide a replacement for oil motor fuels but also reduce emission of harmful substances present in exhaust diesel fumes. The viability of mixed biofuels (mixtures of oil diesel fuels and plant oils) are shown. A study aimed at optimizing the composition of such biofuels is carried out. Oil diesel fuel mixtures with rapeseed and sunflower oils are considered. The method of optimization of the mixture composition is proposed, which is based on determining a unified criterion of optimization calculated as the sum of partial criteria that describe the concentration of nitrogen oxides and carbon soot (smoke opacity) in the exhaust fumes. Optimization calculations of the biofuel composition for the D-245.12S type diesel are performed. It is shown that with the increase of the rapeseed and sunflower oil content in the oil diesel fuel mixture, the toxicity parameters of the exhaust fumes are improved, and even a small addition of the plant oil to the oil diesel fuel significantly improves these parameters in the studied diesel engine.

Keywords: diesel engine, oil diesel fuel, alternative fuel, rapeseed oil, sunflower oil, biofuel mixture, optimization.

Нефтяные топлива до настоящего времени остаются основным видом моторных топлив для мобильных энергетических установок [1]. При эксплуатации различных транспортных средств на территории Российской Федерации ежегодно сжигается около 110...115 млн т нефтяных моторных топлив (автомобильного бензина — 35...40 млн т, дизельного топлива (ДТ) — 55...60 млн т, авиационного керосина — 10...15 млн т) [2]. При их сжигании образуются вредные вещества, на долю которых приходится значительная часть всех токсичных выбросов в атмосферу [3]. Основным потребителем нефтепродуктов является транспорт (прежде всего — автомобильный), за которым следует сельское хозяйство.

По данным работы [4], на долю сельскохозяйственных и лесопромышленных машин приходится 23,5 % всего потребляемого в России моторного топлива и 17,8 % выбросов вредных веществ в атмосферу. Следует отметить, что в структуре затрат на производство сельскохозяйственной продукции доля стоимости ДТ уже превышает 30 %, а в ряде случаев достигает 50 % [5]. В связи с этим в настоящее время все шире внедряются технологии использования в сельском хозяйстве различных альтернативных топлив [6–8]. При этом наиболее перспективными представляются топлива, получаемые из возобновляемого растительного сырья [4, 7, 9]. Государственная программа России по развитию сельского хозяйства и регулированию рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 гг. предусматривает дальнейшее развитие биотехнологий — доведение

к 2020 г. удельного веса отходов сельскохозяйственного производства, переработанного методами биотехнологий, до 12 % [7]. Так, в дизельных двигателях различных транспортных средств и сельскохозяйственной техники уже применяют топлива, получаемые из растительных масел (РастМ).

РастМ как моторные топлива можно использовать как в чистом виде, так и в смеси с дизельным и другими нефтяными топливами, а также с газовыми конденсатами, спиртами, эфирами и другими альтернативными топливами. Для заправки сельскохозяйственной техники применяют сложные метиловые, этиловые и бутиловые эфиры РастМ, называемые биодизельным топливом. Возможна работа дизелей на микроэмульсиях РастМ и их производных со спиртами и водой, а также при введении парообразных производных РастМ во впускную систему как дополнение к впрыскиванию ДТ. Разработаны технологии получения фракций моторного топлива с использованием крекинга РастМ [4, 6, 10].

Источником РастМ служат масличные культуры, в разных частях которых (главным образом в семенах или плодах) содержатся растительные жиры. К масличным относится более 150 видов растений, из которых вырабатывают РастМ. В последние годы рынок РастМ отличался высоким динамизмом: так, к 2000 г. мировой объем их ежегодного производства достиг 80 млн т, а к 2013 г. — 150 млн т. К наиболее значимым РастМ относятся рапсовое (РМ) и подсолнечное (ПМ) масла, суммарное мировое производство которых достигло 40 млн т в год (рис. 1) [11].

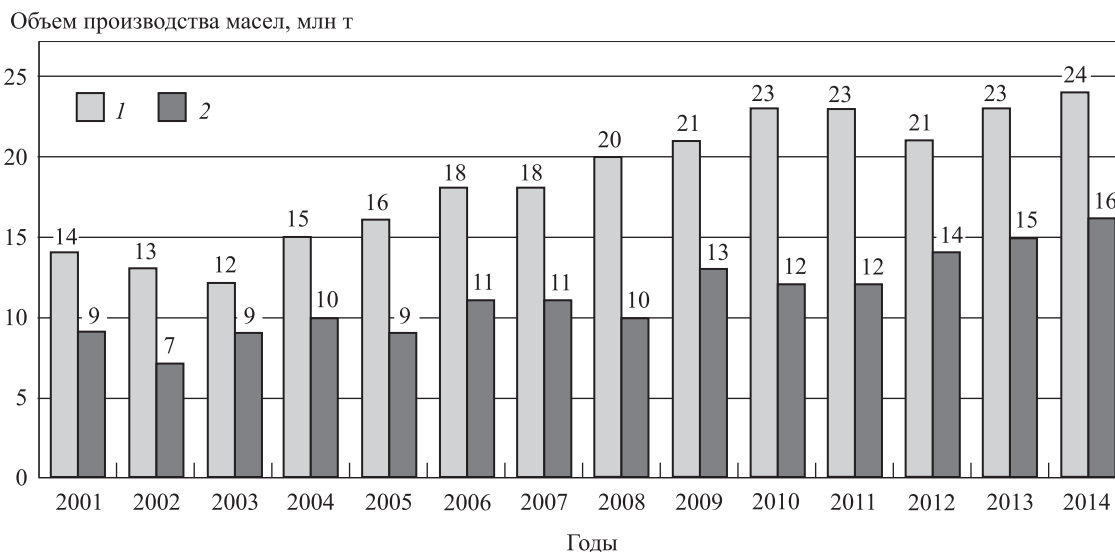


Рис. 1. Динамика мирового производства РМ (1) и ПМ (2)

Структура производства РастМ в России такова: доля подсолнечного масла в общем объеме производства РастМ составляет 86,84 %, соевого — 7,96 %, рапсового — 4,84 %, горчичного — 0,11 %, остальных масел (кукурузного, льняного и др.) — 0,25 % [12]. Таким образом, основными масличными культурами в России являются подсолнечник и рапс: их суммарное производство превысило 3 млн т в год (рис. 2) [13]. Под рапс отведено более 700 тыс. га пахотных земель, под подсолнечник — 6 529 тыс. га [4].

Следует отметить, что использование РастМ в качестве сырья для производства биотоплив практически не оказывает влияния на сектор их производства для пищевых целей. В качестве моторного топлива могут быть использованы технические РастМ, полученные путем экстрагирования семян масличных культур или предварительно отжатого жмыха бензином, гексаном или другими экстрагентами. Для технического применения подходят низкокачественные и просроченные РастМ. Значительной сырьевой базой для производства биотоплив являются

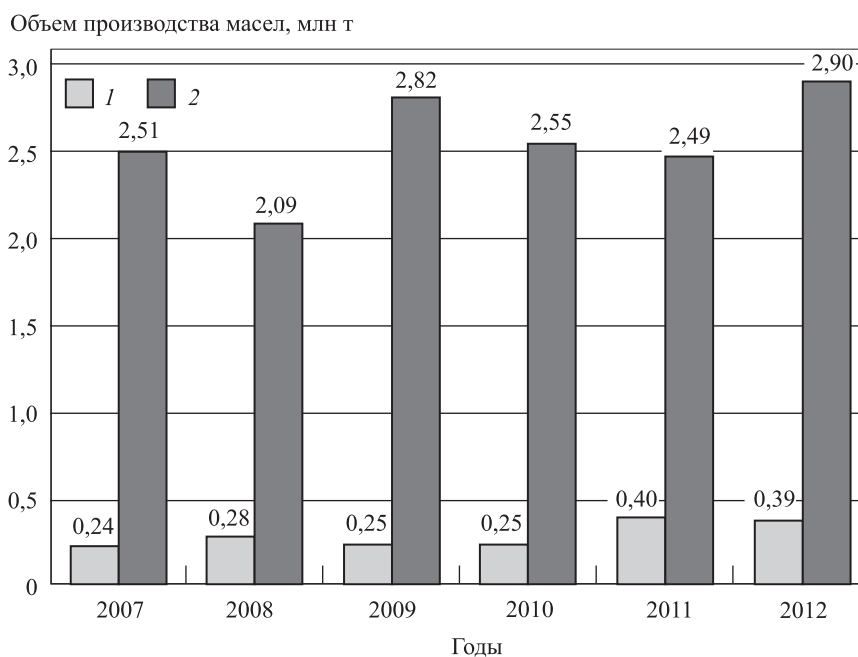


Рис. 2. Динамика производства РМ (1) и ПМ (2) в России

использованные для жарки фритюрные масла [4]. Масличные культуры, предназначенные для производства биотоплива, можно выращивать на территориях, непригодных для производства продуктов питания (в районах с неблагоприятной экологической обстановкой, на участках, прилегающих к автомобильным магистралям и промышленным предприятиям).

Следует отметить, что для условий сельской местности, где отсутствует инфраструктура для производства эфиров РастМ, наиболее привлекательным моторным топливом для дизельного двигателя являются смеси нефтяного ДТ с РМ или ПМ с небольшим содержанием РастМ [4, 14]. Эти компоненты хорошо смешиваются в любых пропорциях, образуя стабильные смеси, а по физико-химическим и эксплуатационным свойствам они достаточно близки нефтяным ДТ [4, 15]. В связи с этим возможна работа дизелей на указанных биотопливах без существенных конструкционных изменений двигателей и их систем.

Известны отечественные и зарубежные исследования дизелей, работающих на РМ и ПМ и их смесях с нефтяным ДТ [4, 6, 9, 16, 17]. При этом недостаточно изученной остается проблема определения оптимального состава указанных смесей, обеспечивающего наилучшие показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ). При разработке методики решения такой оптимизационной задачи и проведении оптимизационных расчетов использованы результаты испытаний дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), приведенные

в работе [4]. Этот двигатель производства Минского моторного завода установлен на малотоннажных грузовых автомобилях ЗИЛ-5301 «Бычок», а его модификации — на автобусах Павловского автомобильного завода и тракторах «Беларусь» Минского тракторного завода.

Основные параметры дизеля Д-245.12С

Тип двигателя	Четырехтактный, рядный, дизельный
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	110
Ход поршня, мм	125
Общий рабочий объем, л	4,32
Степень сжатия	16,0
Система турбонаддува	Турбокомпрессор ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	2 400
Номинальная мощность, кВт	80
Система питания	Разделенного типа ТНВД* Рядный типа PP4M10U1f фирмы Motorpal с всережимным центробежным регулятором
Диаметр плунжеров ТНВД, мм	10
Ход плунжеров ТНВД, мм	10
Длина нагнетательных топливопроводов, мм	540
Тип форсунок	ФДМ-22 ОАО «Куроаппаратура» (г. Вильнюс)
Тип распылителей форсунок	DOP 119S534 (фирмы Motorpal) с пятью сопловыми отверстиями диаметром $d_p = 0,34$ мм и проходным сечением $\mu_p f_p = 0,250$ мм ²
Давление начала впрыскивания форсунок, МПа	21,5

Примечание. ТНВД — топливный насос высокого давления.

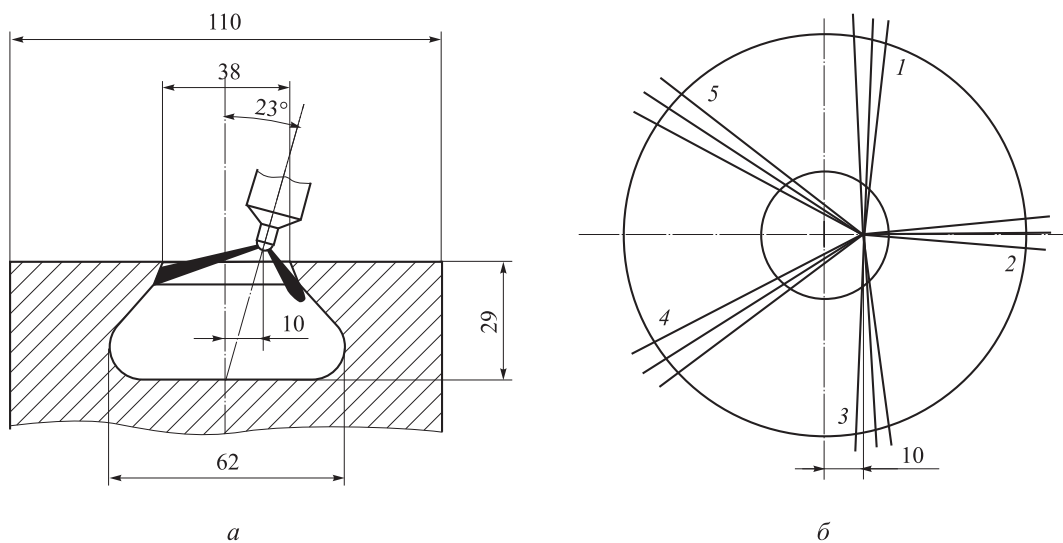


Рис. 3. Камера сгорания дизеля Д-245.12С со схемой расположения форсунки (а) и ориентация струй (1–5) распыливаемого топлива (б)

В дизеле Д-245.12С использована камера сгорания типа ЦНИДИ (Центральный научно-исследовательский дизельный институт) и организовано объемно-пленочное (пристеночное) смесеобразование с частичным попаданием топливных струй на горячие боковые стенки камеры сгорания, прилегающие к горловине (рис. 3). Это обеспечивает стабильное воспламенение биотоплив (РМ, ПМ и их смесей с ДТ), отличающихся от нефтяного ДТ худшей воспламеняемостью.

Цель работы — оценка показателей дизельного двигателя при его работе на смесевых биотопливах различного состава.

На первом этапе экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С его испытывали на чистом ДТ марки «Л» по ГОСТ 305–82 и смесях ДТ и РМ с содержанием последнего от 0 до 60 %. Свойства этих топлив приведены в табл. 1.

Дизель Д-245.12С исследовали на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) и

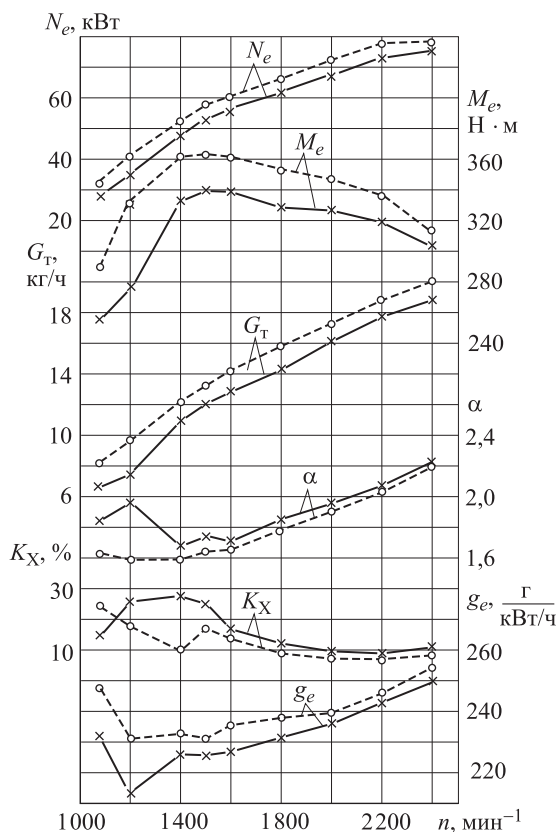


Рис. 4. Зависимость эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , часового расхода топлива G_t , коэффициента избытка воздуха α , дымности ОГ K_x и удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения n коленчатого вала дизельного двигателя Д-245.12С на режимах ВСХ: — — ДТ; - - - - смесь 80 % ДТ и 20 % РМ

13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН (цикл *ECE R49*) с установочным углом опережения впрыскивания топлива $\theta = 13^\circ$ поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки и неизменным положением упора дозирующей рейки ТНВД. Дымность ОГ измеряли дымомером типа МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью $\pm 1\%$. Концентрации NO_x , CO , CH_x в ОГ определяли газоанализатором SAE-7532 японской фирмы Yanaco с погрешностью $\pm 1\%$. Сначала дизель испытывали на режимах ВСХ на нефтяном ДТ и смесевом биотопливе, содержащем 80 % ДТ (по объему) и 20 % РМ. Результаты этих испытаний приведены на рис. 4 и в табл. 2. Затем дизель исследовали на режимах 13-ступенчатого цикла *ECE R49* на той же смеси. Режимы этого цикла показаны на рис. 5, а результаты исследований — на рис. 6 и в табл. 2.

По приведенным на рис. 6, б, в, г характеристикам содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов (оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , углеводородов CH_x) рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы (соответственно e_{NO_x} , e_{CO} , e_{CH_x}) на 13 режимах цикла *ECE R49*. При оценке интегральной токсичности ОГ двигателя на каждом режиме определены концентрации в ОГ токсичных компонентов C_{NO_x} , C_{CO} , C_{CH_x}

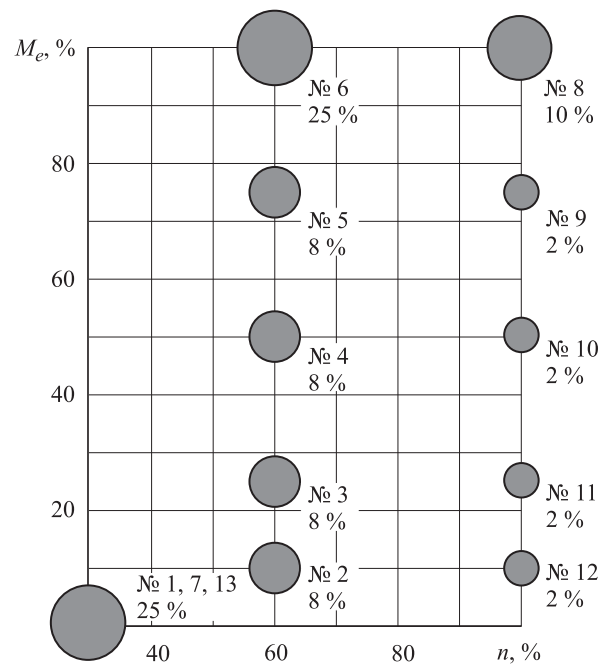


Рис. 5. Испытательный 13-режимный цикл *ECE R49* для оценки токсичности ОГ дизелей в стендовых условиях (около точки каждого режима указаны его номер и доля времени K_i в общем времени работы)

Таблица 1

Физико-химические свойства нефтяного ДТ и смесей ДТ и РМ

Свойство	Вид топлива				
	ДТ	РМ	80 % ДТ + 20 % РМ	60 % ДТ + 40 % РМ	40 % ДТ + 60 % РМ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	916	848	865	882
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,8	75,0	9,0	19,0	30,0
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	—	—	—
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42 500	37 300	41 500	40 400	39 400
Цетановое число	45	36	—	—	—
Температура самовоспламенения, °С	250	318	—	—	—
Температура помутнения, °С	-25	-9	—	—	—
Температура застывания, °С	-35	-20	—	—	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,5	14,0	13,6	13,2
Массовое содержание, %:					
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

Примечание. Прочерк «—» означает, что свойство не определялось; для смеси ДТ и РМ указано объемное процентное содержание компонентов.

Таблица 2

Показатели дизельного двигателя Д-245.12С, работающего на смесях ДТ и РМ

Показатель	Объемное содержание РМ в смеси с ДТ, %			
	0	20	40	60
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	<u>18,81</u> 12,10	<u>19,94</u> 13,24	<u>20,30</u> 13,71	<u>20,70</u> 13,73
Крутящий момент M_e , Н·м	<u>301</u> 341	<u>311</u> 364	<u>313</u> 364	<u>311</u> 360
Дымность ОГ K_X по шкале Хартриджа, %	<u>11,0</u> 25,0	<u>8,0</u> 16,5	<u>7,0</u> 13,0	<u>8,0</u> 11,0
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)	<u>249,0</u> 225,8	<u>255,1</u> 231,8	<u>258,1</u> 239,8	<u>265,1</u> 243,1
Эффективный КПД дизеля η_e	<u>0,340</u> 0,375	<u>0,340</u> 0,374	<u>0,345</u> 0,372	<u>0,345</u> 0,376
Условные (средние) показатели топливной экономичности дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла:				
эффективный расход $g_{e, усл}$ топлива, г/(кВт·ч)	247,20	254,38	259,40	272,23
эффективный КПД $\eta_{e, усл}$	0,343	0,341	0,343	0,336
Интегральные удельные выбросы токсичных компонентов на режимах 13-ступенчатого цикла, г/(кВт·ч):				
оксидов азота e_{NO_x}	7,442	7,159	7,031	6,597
монооксида углерода e_{CO}	3,482	3,814	3,880	3,772
несгоревших углеводородов e_{CH_x}	1,519	0,965	0,949	1,075

Примечание. В числителе приведены значения для режима максимальной мощности, в знаменателе — максимального крутящего момента.

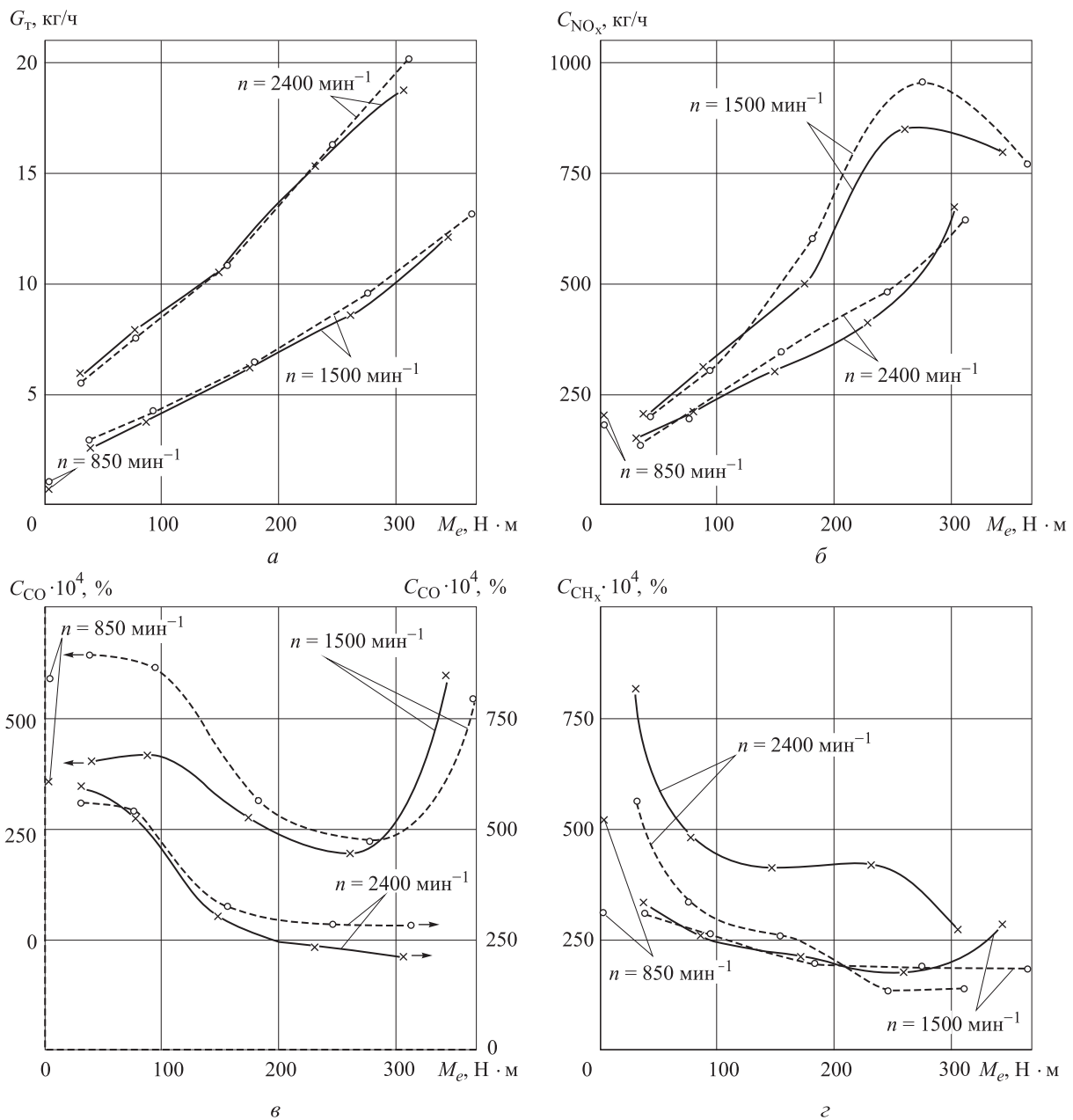


Рис. 6. Зависимости часового расхода топлива G_T (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота C_{NO_x} (б), монооксида углерода C_{CO} (в) и углеводородов C_{CH_x} (г) от частоты вращения n и крутящего момента M_e дизельного двигателя Д-245.12С при использовании различных топлив: — — ДТ; - - - - смесь 80 % ДТ и 20 % РМ

и рассчитаны их часовые массовые выбросы (E_{NO_x} , E_{CO} , E_{CH_x}). Полученные значения вредных выбросов суммированы за весь цикл по каждому компоненту (с учетом весовых коэффициентов K_i , отражающих долю времени каждого режима) и затем делением на условную среднюю мощность дизеля за испытательный цикл $\sum(N_{ei}K_i)$ определены удельные массовые выбросы вредных веществ по формулам [3, 4]:

$$e_{NO_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{NO_x i} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}; \quad e_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{CO i} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}; \quad (1)$$

$$e_{CH_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{CH_x i} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}.$$

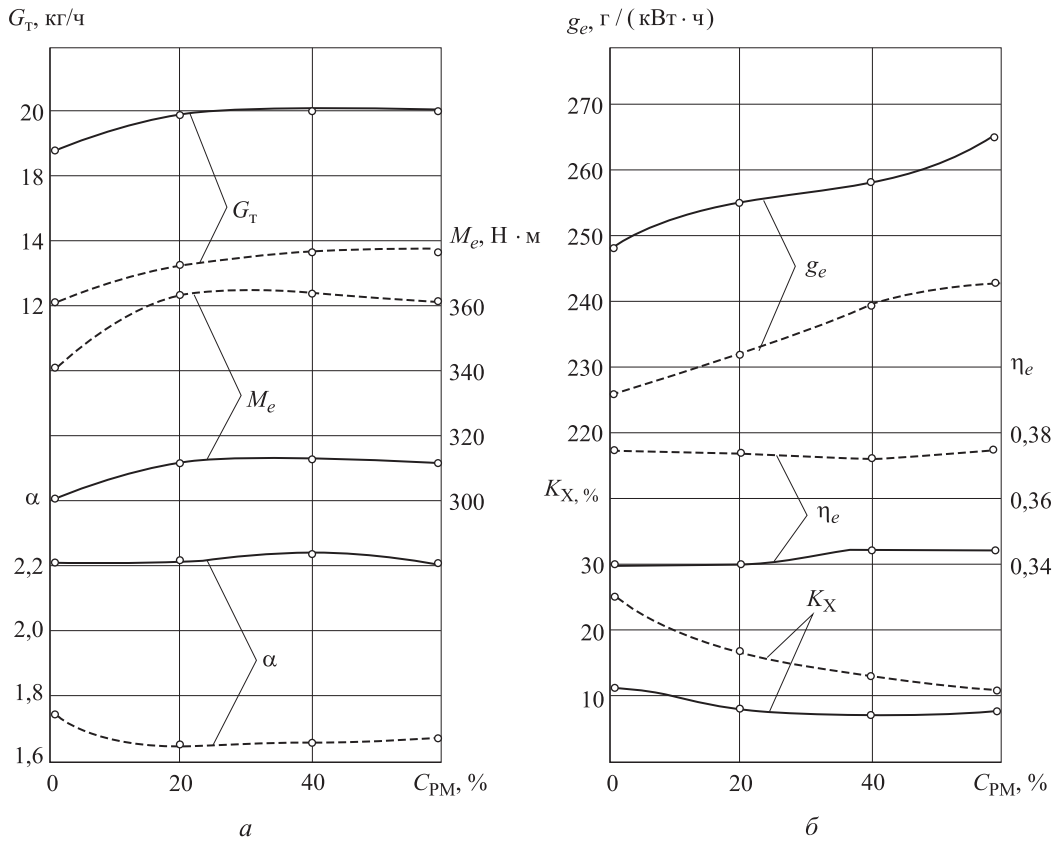


Рис. 7. Зависимости часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e , коэффициента избытка воздуха α (а), удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_X (б) дизельного двигателя Д-245.12С от содержания РМ в смеси C_{PM} на режимах ВСХ: — максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; - - - максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

С использованием характеристик часового расхода топлива G_T (см. рис. 6, а) определены значения удельного эффективного расхода топлива g_e и эффективного КПД η_e по зависимостям [3, 4]

$$g_e = \frac{1000G_T}{N_e}; \quad \eta_e = \frac{3600}{H_U g_e}, \quad (2)$$

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

Оценка интегрального расхода топлива на режимах рассматриваемого цикла проведена по среднему (условному) удельному эффективному расходу топлива, определенному с использованием зависимости [3, 4]

$$g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{Ti} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad (3)$$

где G_{Ti} — часовой расход топлива на i -м режиме.

Для интегральной оценки топливной экономичности дизеля, работающего на смешевых

биотопливах на режимах 13-ступенчатого цикла, использован также условный эффективный КПД, определяемый из соотношения [3, 4]:

$$\eta_{e \text{ усл}} = \frac{3600}{H_U g_{e \text{ усл}}}. \quad (4)$$

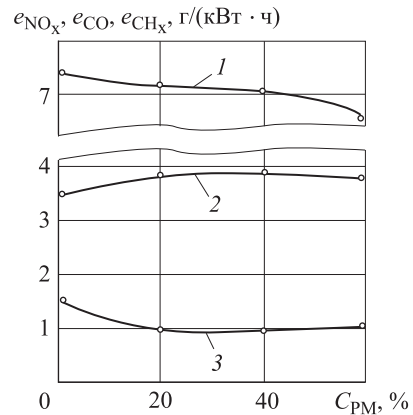


Рис. 8. Зависимость удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NO_x} (1), монооксида углерода e_{CO} (2) и углеводородов e_{CH_x} (3) от содержания РМ в смеси C_{PM} при работе дизельного двигателя Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого цикла

Результаты проведенных по формулам (1)–(4) расчетов параметров дизеля Д-245.12С, работающего на смеси 80 % ДТ и 20 % РМ, представлены в табл. 2. Исследованы также смеси, содержащие 40 и 60 % РМ. Результаты этих исследований приведены на рис. 7, 8 и в табл. 2.

На втором этапе экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С его испытывали на чистом ДТ марки «Л» по ГОСТ 305–82 и на смесях ДТ и ПМ с содержанием последнего от 0 до 20 %. Свойства этих топлив приведены в табл. 3.

Результаты испытаний дизельного двигателя Д-245.12С на нефтяном ДТ и смеси 80 % ДТ и 20 % ПМ на режимах ВСХ приведены на рис. 9 и в табл. 4, а на режимах 13-ступенчатого цикла ECE R49 — на рис. 10 и в табл. 4.

Кроме того, были проведены исследования дизеля Д-245.12С на смесях ДТ и ПМ другого состава, результаты которых представлены в табл. 4 и на рис. 11, 12.

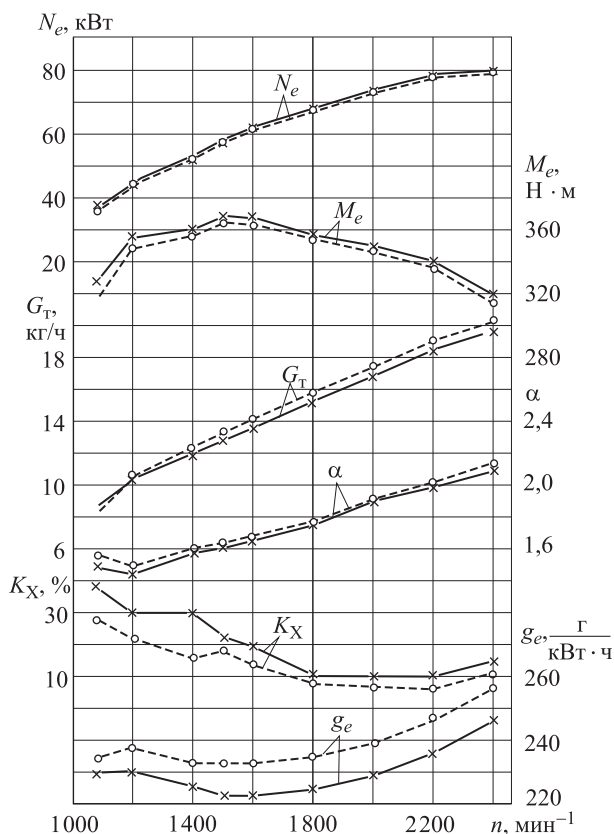


Рис. 9. Зависимость эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , расхода топлива G_t , коэффициента избытка воздуха α , дымности ОГ K_x и удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения n коленчатого вала дизельного двигателя Д-245.12С на режимах ВСХ: — ДТ; - - - смесь 80 % ДТ и 20 % ПМ

Проведенные испытания дизельного двигателя Д-245.12С на смесях нефтяного ДТ с РМ и ПМ подтвердили возможность значительного улучшения его экологических показателей, а также целесообразность оптимизации состава указанных смесевых биотоплив. Задача выбора оптимального состава смесевых биотоплив достаточно сложна и не имеет однозначного решения. Это обусловлено тем, что работа дизеля характеризуется целым комплексом показателей (критериев) топливной экономичности и токсичности ОГ. Требования к выбору оптимального по данным критериям состава топлива часто противоречат друг другу. В результате задача выбора оптимального состава смесевых биотоплив становится многокритериальной оптимизационной задачей [3, 4, 18].

Известны различные методики решения многокритериальных задач оптимизации, которые классифицируют в зависимости от числа оптимизируемых параметров, количества критериев оптимальности, особенностей их задания и определения степени их значимости. Наиболее известными являются: оптимизация иерархической последовательности частных критериев; определение решения, основанное на том или ином виде компромисса, определение множества неулучшаемых точек [3, 19]. Разработаны и методики многокритериальной оптимизации различных параметров двигателей внутреннего сгорания. Применительно к задаче оптимизации состава смесевых топлив можно использовать методики, приведенные в работах [3, 18–20]. Они основаны на одном из самых эффективных методов оптимизации — методе свертки, при котором обобщенный критерий оптимальности формируется в виде суммы частных критериев. В частности, в работе [19] предложена методика оптимизации состава смесевых биотоплив — смесей нефтяного ДТ с РМ, построенная на составлении обобщенного аддитивного критерия оптимальности в виде суммы

$$J_o = a_{\eta_e} J_{\eta_e} + a_{NO_x} J_{NO_x} + a_{CO} J_{CO} + a_{CH_x} J_{CH_x}, \quad (5)$$

где J_{η_e} , J_{NO_x} , J_{CO} , J_{CH_x} — частные критерии оптимальности соответственно по топливной экономичности (эффективному КПД η_e), выбросам NO_x , CO , CH_x ; a_{η_e} , a_{NO_x} , a_{CO} , a_{CH_x} — весовые коэффициенты частных критериев оптимальности. Частные критерии оптимальности, входящие в выражение (5), предлагается определять на каждом i -м режиме из соотношений

Таблица 3

Физико-химические свойства нефтяного ДТ и смесей ДТ и ПМ

Свойство	Вид топлива				
	ДТ	ПМ	95 % ДТ + 5 % ПМ	90 % ДТ + 10 % ПМ	80 % ДТ + 20 % ПМ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	923	834,7	839,3	848,6
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,8	72,0	5,0	6,0	8,0
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,0	—	—	—
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42 500	37 000	42 100	41 900	41 400
Цетановое число	45	33	—	—	—
Температура самовоспламенения, °С	250	320	—	—	—
Температура помутнения, °С	-25	-7	—	—	—
Температура застывания, °С	-35	-18	—	—	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг	14,3	12,4	14,2	14,1	13,9
Массовое содержание, %:					
С	87,0	77,6	86,5	86,1	85,1
Н	12,6	11,5	12,5	12,5	12,4
О	0,4	10,9	1,0	1,4	2,5

Примечание. Прочерк «—» означает, что свойство не определялось; для смеси ДТ и ПМ указано объемное процентное содержание компонентов.

Таблица 4

Показатели дизельного двигателя Д-245.12С, работающего на смесях ДТ и ПМ

Показатель	Объемное содержание ПМ в смеси с ДТ, %			
	0	5	10	20
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	<u>19,70</u>	<u>19,78</u>	<u>19,96</u>	<u>20,20</u>
	13,72	13,84	13,97	14,10
Крутящий момент M_e , Н·м	<u>317</u>	<u>318</u>	<u>316</u>	<u>313</u>
	368	368	367	364
Дымность ОГ K_x по шкале Хартриджа, %	<u>14,5</u>	<u>12,5</u>	<u>12,0</u>	<u>11,0</u>
	20,0	16,5	15,0	14,0
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)	<u>246,8</u>	<u>248,1</u>	<u>251,3</u>	<u>256,2</u>
	222,6	224,6	226,9	231,1
Эффективный КПД дизеля η_e	<u>0,343</u>	<u>0,345</u>	<u>0,342</u>	<u>0,339</u>
	0,381	0,386	0,379	0,376
Условные (средние) показатели топливной экономичности дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла: эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$, г/(кВт·ч) эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	230,52	245,91	246,09	248,94
	0,367	0,353	0,349	0,349
Интегральные удельные выбросы токсичных компонентов на режимах 13-ступенчатого цикла, г/(кВт·ч): оксидов азота e_{NO_x} монооксидов углерода e_{CO} несгоревших углеводородов e_{CH_x}	6,630	6,626	6,649	6,078
	2,210	2,146	2,091	2,257
	0,580	0,563	0,580	0,647

Примечание. В числителе приведены значения для режима максимальной мощности, в знаменателе — максимального крутящего момента.

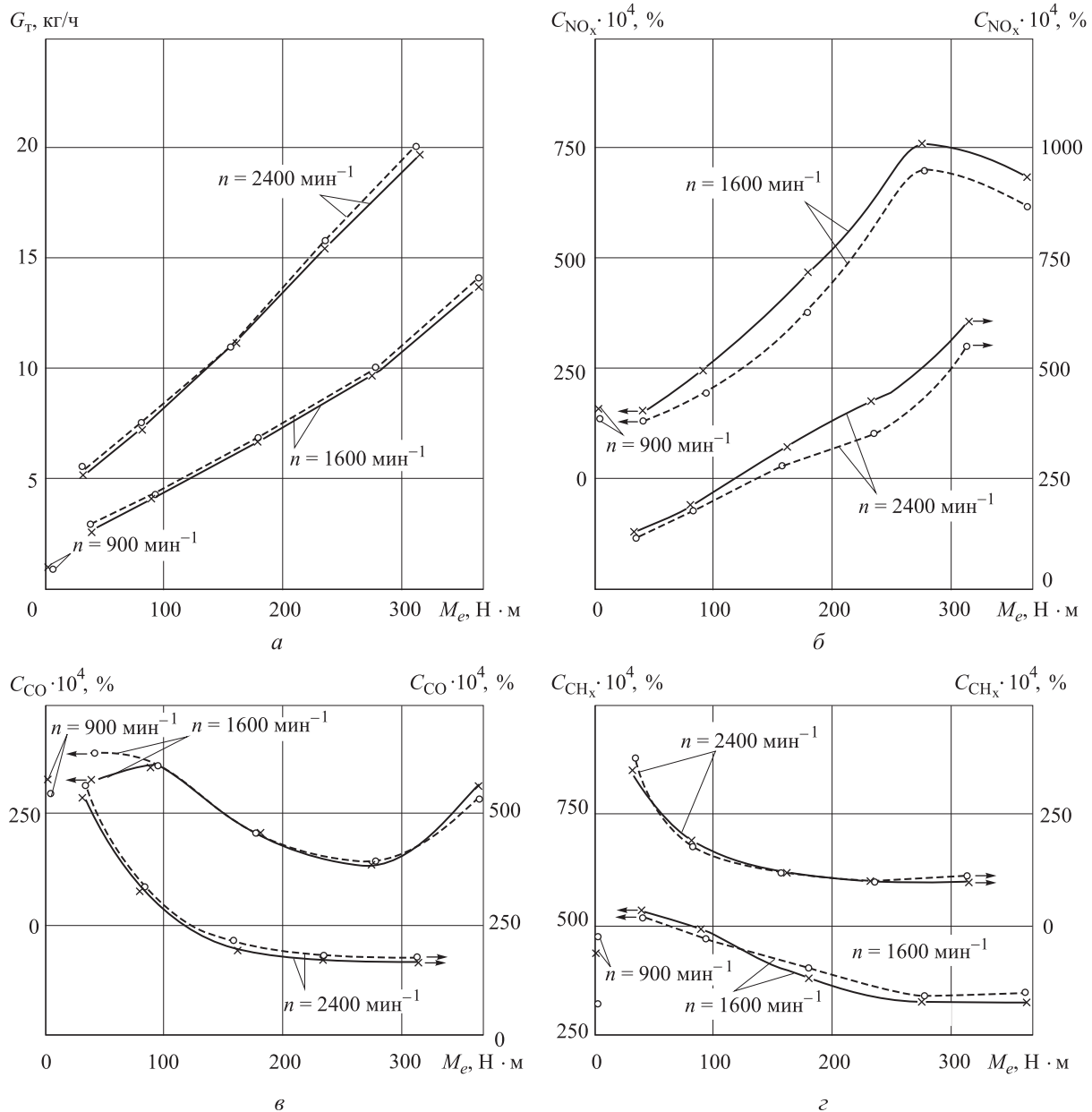


Рис. 10. Зависимости часового расхода топлива G_T (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота C_{NO_x} (б), монооксида углерода C_{CO} (в) и углеводородов C_{CH_x} (г) от частоты вращения n и крутящего момента M_e дизеля Д-245.12С:

— ДТ; - - - смесь 80 % ДТ и 20 % ПМ

$$\begin{aligned} J_{\eta_e} &= \eta_{e \text{ ДТ}} / \eta_{ei}; & J_{NO_x} &= e_{NO_x i} / e_{NO_x \text{ ДТ}}; \\ J_{CO} &= e_{CO i} / e_{CO \text{ ДТ}}; & J_{CH_x} &= e_{CH_x i} / e_{CH_x \text{ ДТ}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где η_{ei} , $e_{NO_x i}$, $e_{CO i}$, $e_{CH_x i}$ — параметры дизеля, работающего на i -м топливе; $\eta_{e \text{ ДТ}}$, $e_{NO_x \text{ ДТ}}$, $e_{CO \text{ ДТ}}$, $e_{CH_x \text{ ДТ}}$ — параметры дизеля, работающего на нефтяном ДТ.

При решении оптимизационной задачи с использованием формул (5) и (6) обобщенный критерий оптимальности J_o минимизируется. При этом удельные массовые выбросы токсич-

ных компонентов ОГ $e_{NO_x i}$, $e_{CO i}$, $e_{CH_x i}$ (числители выражений для частных критериев J_{NO_x} , J_{CO} , J_{CH_x}) минимизируются, а эффективный КПД η_{ei} (знаменатель выражения для частного критерия J_{η_e}) — максимизируется.

Наиболее сложной проблемой применения этой методики является выбор значений весовых коэффициентов частных критериев оптимальности, который не имеет однозначного решения. Другим недостатком методики является то, что она не учитывает такой важный показатель работы дизеля, как дымность ОГ.

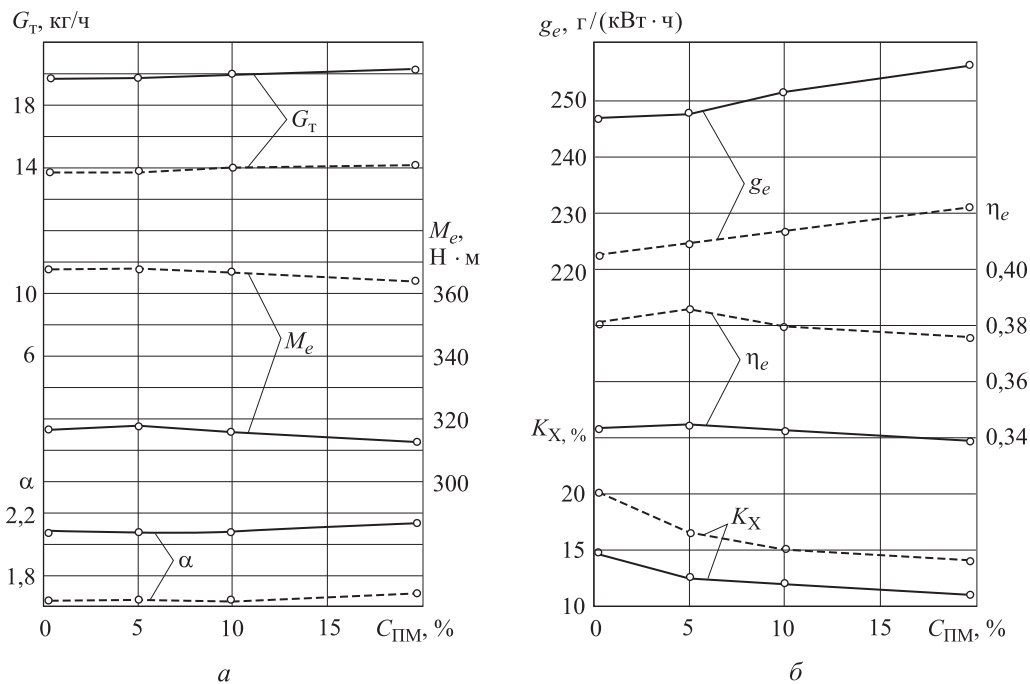


Рис. 11. Зависимость часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e , коэффициента избытка воздуха α (а), удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_X (б) дизеля Д-245.12С от содержания ПМ в смеси C_{PM} на режимах ВСХ: — — максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; - - - - максимального крутящего момента при $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$

Следует также отметить и трудоемкость ее использования, обусловленную необходимостью расчетов сразу четырех частных критериев и их суммы — обобщенного критерия. Причем каждый из частных критериев формулы (5) вычисляют как результат суммирования данных по соответствующим показателям на 13 режимах [19]. При оценке интегральной токсичности ОГ двигателя на режимах такого цикла проводят достаточно трудоемкий расчет удельных массовых выбросов вредных веществ по формулам (1).

С целью устранения указанных недостатков для оптимизации состава смесевых биотоплив предложено использовать следующую методику. Во-первых, желательно сократить число частных критериев оптимальности выражения (5). При этом выше отмечена сравнительно слабая зависимость эффективного КПД η_e исследуемого дизеля Д-245.12С от состава смесей нефтяного ДТ с РМ (см. рис. 7, б) и ПМ (см. рис. 11, б). При оптимизации состава смесевых биотоплив это обстоятельство позволяет не учитывать частный критерий, характеризующий топливную экономичность исследуемого дизеля. Во-вторых, известно, что из нормируемых газообразных токсичных компонентов ОГ дизелей наиболее значимыми являются оксиды

азота NO_x . Их доля в суммарных токсичных выбросах дизелей составляет от 30 до 80 % по массе и от 60 до 95 % по эквивалентной токсичности [3].

Другой важнейший токсичный компонент ОГ дизелей — твердые частицы (выброс сажи или дымность ОГ). Высокая потенциальная опасность этих частиц обусловлена их способностью аккумулировать на своей поверхности многие известные канцерогены и мутагены, а также незначительными размерами частиц, позволяющими им проникать в органы дыхания человека и накапливаться в них. Еще два

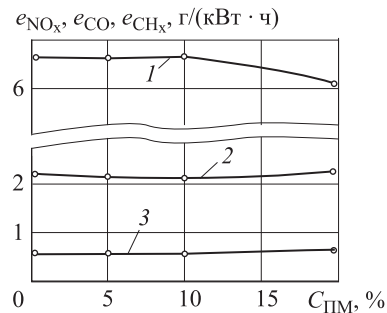


Рис. 12. Зависимость удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NO_x} (1), монооксида углерода e_{CO} (2) и углеводородов e_{CH_x} (3) от содержания ПМ в смеси C_{PM} при работе дизеля Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого цикла

нормируемых токсичных компонента — монооксид углерода CO и углеводороды CH_x — имеют значительно меньшую токсикологическую значимость. Так, в соответствии с данными работы [3], токсикологическую значимость CO, NO_x, CH_x, твердых частиц и оксидов серы SO_x оценивают как отношение 1:41,1:3,16:200:22. Следует отметить, что выброс твердых частиц с ОГ характеризуется выбросом сажи или дымностью ОГ, но определение дымности ОГ значительно проще, чем измерение выбросов твердых частиц. В связи с этим в предлагаемой методике оптимизации состава смесового биотоплива в качестве двух основных частных критериев оптимизации приняты концентрации в ОГ оксидов азота и сажи (дымность ОГ).

При оценке токсичности ОГ дизельных двигателей применяют испытательные циклы, в той или иной мере отражающие реальные распределения режимов их работы. В Европе дизели грузовых автомобилей грузоподъемностью более 3,5 т (для автобусов с числом посадочных мест свыше 9) до 2000 г. испытывали в стендовых условиях на 13 установившихся режимах см. рис. 5) цикла *ECE R49*. При этом доля времени режима максимальной мощности (см. рис. 5, № 8) составляет 10 % от общего времени работы двигателя, а доля режима максимального крутящего момента (см. рис. 5, № 6) — 25 %. В соответствии с ГОСТ 17.2.2.01–84 («Дымность отработавших газов дизелей») и Правилами ЕЭК R 24-02 ООН дымность ОГ определяют только на режимах ВСХ. При этом наиболее важными являются режимы максимальной мощности и максимального крутящего момента.

С учетом изложенных факторов для решения задачи оптимизации состава смесового биотоплива для дизеля Д-245.12С предложено использовать метод свертки, при котором частные критерии оптимальности сводятся к обобщенному критерию J_o . Последний определяют в виде суммы основных частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ оксидов азота J_{NO_x} и дымность ОГ по шкале Хартриджа J_{K_X} :

$$J_o = J_{NO_x} + J_{K_X}. \quad (7)$$

Проведенный анализ показал, что при оптимизации состава исследуемых смесей целесообразно учитывать принятые основные показатели токсичности ОГ на двух основных режимах — максимальной мощности N_{max} и макси-

мального крутящего момента M_{max} . Тогда выражение (7) принимает вид

$$J_o = J_{NO_x N_{max}} + J_{NO_x M_{max}} + J_{K_X N_{max}} + J_{K_X M_{max}}, \quad (8)$$

где $J_{NO_x N_{max}}$, $J_{NO_x M_{max}}$ и $J_{K_X N_{max}}$, $J_{K_X M_{max}}$ — соответственно концентрация в ОГ оксидов азота и дымность ОГ по шкале Хартриджа на указанных режимах (частные критерии оптимальности).

Поскольку в качестве частных критериев оптимальности выражения (8) приняты концентрация в ОГ оксидов азота C_{NO_x} и дымность ОГ по шкале Хартриджа K_X , имеющие различную размерность, представляется целесообразным их использование в относительных величинах:

$$\begin{aligned} J_{NO_x N_{max}} &= C_{NO_x N_{max} i} / C_{NO_x N_{max} ДТ}; \\ J_{NO_x M_{max}} &= C_{NO_x M_{max} i} / C_{NO_x M_{max} ДТ}; \\ J_{K_X N_{max}} &= K_{X N_{max} i} / K_{X N_{max} ДТ}; \\ J_{K_X M_{max}} &= K_{X M_{max} i} / K_{X M_{max} ДТ}, \end{aligned} \quad (9)$$

где параметры с индексом «ДТ» соответствуют работе на нефтяном ДТ, а параметры с индексом «i» — работе на смесовом биотопливе *i*-го состава.

Обобщенный критерий оптимальности (8) также удобно использовать в относительном виде:

$$\bar{J}_o = J_{oi} / J_{o ДТ}. \quad (10)$$

Таким образом, предложенная методика оптимизации смесового биотоплива предполагает формирование обобщенного критерия оптимальности в виде выражения (8) или (10). Минимум обобщенного критерия соответствует оптимальному составу смесового биотоплива. При этом частные критерии оптимизации, характеризующие концентрацию в ОГ оксидов азота J_{NO_x} и дымность ОГ по шкале Хартриджа J_{K_X} на двух основных режимах — максимальной мощности N_{max} и максимального крутящего момента M_{max} , определяют по выражениям (9). Такая методика не предполагает ранжирования (определения значимости) этих частных критериев оптимальности путем задания соответствующих весовых коэффициентов, как это принято в выражении (5). Кроме того, она отличается от методики (5) существенно меньшим объемом вычислений.

Предложенная методика применена для оптимизации состава смесей нефтяного ДТ с РМ и

Таблица 5

Оптимизация состава смесей нефтяного ДТ с РМ и ПМ для дизельного двигателя Д-245.12С

Вид топлива	Показатели дизеля									
	$C_{NO_x N_{max}}$, ppm	$J_{NO_x N_{max}}$	$C_{NO_x M_{max}}$, ppm	$J_{NO_x M_{max}}$	$K_{X N_{max}}$, %	$J_{K_X N_{max}}$	$K_{X M_{max}}$, %	$J_{K_X M_{max}}$	J_o	\bar{J}_o
<i>Смеси нефтяного ДТ и РМ</i>										
ДТ	675	1,000	800	1,000	11,0	1,000	25,0	1,000	4,000	1,000
80 % ДТ + 20 % РМ	650	0,963	770	0,963	8,0	0,727	16,5	0,660	3,313	0,828
60 % ДТ + 40 % РМ	640	0,948	750	0,938	7,0	0,636	13,0	0,520	3,042	0,761
40 % ДТ + 60 % РМ	550	0,815	770	0,963	8,0	0,727	11,0	0,440	2,945	0,736
<i>Смеси нефтяного ДТ и ПМ</i>										
ДТ	605	1,000	680	1,000	14,5	1,000	20,0	1,000	4,000	1,000
95 % ДТ + 5 % ПМ	600	0,992	685	1,007	12,5	0,862	16,5	0,825	3,686	0,922
90 % ДТ + 10 % ПМ	580	0,959	675	0,993	12,0	0,828	15,0	0,750	3,530	0,883
80 % ДТ + 20 % ПМ	550	0,909	615	0,904	11,0	0,759	14,0	0,700	3,272	0,818

ПМ для дизельного двигателя Д-245.12С. При этом использованы представленные выше экспериментальные данные. Результаты вычислений частных критериев оптимальности по выражениям (9) и обобщенного критерия оптимальности по формулам (8) и (10) приведены в табл. 5.

Полученные результаты оптимизации свидетельствуют о том, что для дизеля Д-245.12С, работающего на смесевых биотопливах, при росте содержания рассматриваемых масел в смеси с нефтяным ДТ значения обобщенного критерия оптимальности \bar{J}_o монотонно уменьшаются. Оптимальное в соответствии с выражениями (8) и (10) содержание РастМ в указанных смесях соответствует максимальному (в рассматриваемом диапазоне) содержанию РастМ. Для смесей нефтяного ДТ и РМ минимум обобщенного критерия оптимальности ($\bar{J}_o = 0,736$) получен при содержании масла в смеси $C_m = 60\%$, а для смесей нефтяного ДТ и ПМ этот минимум ($\bar{J}_o = 0,818$) отмечен при $C_m = 20\%$. При работе на нефтяном ДТ обобщенный критерий оптимальности равен единице (см. табл. 5 и рис. 13).

Следует отметить небольшие различия значений обобщенного критерия оптимальности \bar{J}_o для смесей ДТ с РМ и ПМ (см. рис. 13), т. е. близкий характер протекания двух рассматриваемых характеристик $\bar{J}_o = f(C_m)$, что подтверждает близкие экологические качества РМ и ПМ. По мере увеличения содержания РастМ в

смеси с нефтяным ДТ обобщенный критерий оптимальности \bar{J}_o постоянно уменьшается, но его снижение наиболее заметно при небольшом содержании масла в смесевом биотопливе (см. рис. 13). В частности, при переводе исследуемого дизеля с нефтяного ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % РМ дымность ОГ снижается с 11,0 до 8,0 % и с 25,0 до 16,5 % по шкале Хартриджа на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента соответственно. При этом на режимах 13-ступенчатого цикла интегральный выброс оксидов азота снизился с 7,442 до 7,159 г/(кВт·ч), а выброс углеводородов — с 1,519 до 0,965 г/(кВт·ч) при незначительном росте выброса монооксида углерода (см. табл. 3). Это свидетельствует о том, что даже небольшая добавка РастМ в нефтяное ДТ

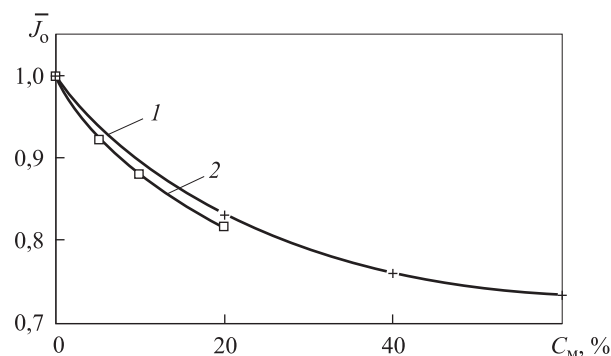


Рис. 13. Зависимость обобщенного критерия оптимальности \bar{J}_o от содержания растительных масел C_m в смесях нефтяного ДТ с РМ (1) и ПМ (2)

значительно улучшает показатели токсичности ОГ исследуемого дизеля.

Выводы

1. Показано, что применение в качестве моторного топлива растительных масел — РМ и ПМ — в смесях с нефтяным ДТ позволяет существенно улучшить показатели токсичности ОГ.

2. Предложена методика оптимизации этих смесей, базирующаяся на определении обобщенного критерия оптимальности, вычисляемого в виде суммы частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ оксидов азота и сажи — дымность ОГ на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента.

3. Анализ результатов оптимизационного расчета состава биотоплива для дизеля типа Д-245.12С показал, что с увеличением содержа-

ния РМ и ПМ в смеси с нефтяным ДТ токсичность ОГ уменьшается и даже небольшая добавка РМ в ДТ значительно улучшает параметры токсичности. В частности, при переводе исследуемого дизеля с нефтяного ДТ на его смесь с 20 % РМ дымность ОГ снижается с 11,0 до 8,0 % и с 25,0 до 16,5 % по шкале Хартриджа на режимах соответственно максимальной мощности и максимального крутящего момента. При этом на режимах 13-ступенчатого цикла интегральный выброс оксидов азота уменьшился с 7,442 до 7,159 г/(кВт·ч).

4. Расчетно-экспериментальные исследования подтвердили эффективность использования предложенной методики оптимизации состава рассматриваемых смесевых биотоплив, а также информативность методики при оценке экологических качеств различных топлив и сравнительно небольшой объем расчетных исследований.

Литература

- [1] Русаков В.В., Лapidус А.Л., Крылов И.Ф., Емельянов В.Е. *Углеводородные и альтернативные топлива на основе природного газа*. Москва, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 188 с.
- [2] Александров А.А., Архаров И.А., Багров В.В., Девянин С.Н., Ксенофонтов Б.С., Лобанов Б.С., Марков В.А., Середа А.В., Шарин Е.А., Шпак А.В. *Нефтяные моторные топлива: экологические аспекты применения*. Москва, НИЦ «Инженер», Оникo-М, 2014. 691 с.
- [3] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 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, НИЦ «Инженер», Оникo-М, 2011. 536 с.
- [5] Коцарь Ю.А., Головащенко Г.А., Плужников С.В., Коростышевский И.М. Новые источники сырья для биодизеля. *Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо*, 2011, № 4, с. 23–24.
- [6] Александров А.А., Архаров И.А., Багров В.В., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Девянин С.Н., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания*. Москва, НИЦ «Инженер», Оникo-М, 2012. 791 с.
- [7] Федоренко В.Ф., Сорокин Н.Т., Буклагин Д.С., Тихонравов В.С. *Инновационное развитие альтернативной энергетики. Ч. 1*. Москва, Росинформагротех, 2010. 348 с.
- [8] Марков В.А., Девянин С.Н., Спиридонова Л.В. Перспективы использования биотоплив в дизелях. *Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо*, 2015, № 7, с. 31–38.
- [9] Васильев И.П. *Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля*. Луганск, Изд-во Восточноукраинского университета им. В. Даля, 2009. 240 с.
- [10] Тиу Д., Фан С., Дзоу Х. Производство биодизеля из непищевого сырья. *Химия и технология топлив и масел*, 2011, № 2, с. 17–22.
- [11] Ивашура С.В. Рынок масличных в новом столетии. *Масла и жиры*, 2011, № 2, с. 4–7.
- [12] Година Е.Д. Определение степени теплоты сгорания дизельного смесевоего топлива из соевого масла. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*, 2013, т. 10, № 5, с. 25–29.

- [13] Морозов Ю.Н. Анализ масложирового рынка России и возможные перспективы развития. *Масла и жиры*, 2012, № 7, с. 4–6.
- [14] Уханов А.П., Уханов Д.А., Шеменев Д.С. *Дизельное смесевое топливо*. Пенза, РИО ПГСХА, 2012. 147 с.
- [15] Горбачев М. Альтернативные источники энергии для АПК. *Сельский механизатор*, 2007, № 4, с. 6–7.
- [16] Rakopoulos C.D., Rakopoulos D.C., Giakoumis E.G., Dimaratos A.M., Founti M.A. Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: sunflower, cottonseed, corn and olive. *Fuel*, 2011, vol. 90, pp. 3439–3446.
- [17] Onyestyák G., Harnos S., Szegedi A., Kalló D. Sunflower oil to green diesel over Raney-type Ni-catalyst. *Fuel*, 2012, vol. 102, pp. 282–288.
- [18] Марков В.А., Девянин С.Н., Неверова В.В. Показатели токсичности отработавших газов дизельного двигателя, работающего на многокомпонентных смесевых биотопливах. *Безопасность в техносфере*, 2015, № 5, с. 15–27.
- [19] Васильев Ф.П. *Методы оптимизации*. Москва, Факториал Пресс, 2002. 824 с.
- [20] Парсаданов И.В. *Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия*. Харьков, Изд-во ХПИ, 2003. 244 с.

References

- [1] Rusakov V.V., Lapidus A.L., Krylov I.F., Emel'ianov V.E. *Uglevodorodnye i al'ternativnye topliva na osnove prirodnogo gaza* [The hydrocarbon and alternative hydrocarbon fuels from natural gas]. Moscow, RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina publ., 2004. 188 p.
- [2] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Bagrov V.V., Devianin S.N., Ksenofontov B.S., Lobanov B.S., Markov V.A., Sereda A.V., Sharin E.A., Shpak A.V. *Neftianye motornye topliva: ekologicheskie aspekty primeneniia* [Oil fuel: environmental aspects of the use]. Moscow, NITs «Inzhener» publ., Oniko-M publ., 2014. 691 p.
- [3] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelei* [Exhaust emissions of diesel engines]. Moscow, Bauman Press, 2002. 376 p.
- [4] Markov V.A., Devianin S.N., Semenov V.G., Shakhov A.V., Bagrov V.V. *Ispol'zovanie rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigateliakh* [The use of vegetable oils and fuels based on their diesel engines]. Moscow, NITs «Inzhener» publ., Oniko-M publ., 2011. 536 p.
- [5] Kotsar' Iu.A., Golovashchenko G.A., Pluzhnikov S.V., Korostyshevskii I.M. *Novye istochniki syr'ia dlia biodizelia* [The new sources for bio-diesel]. *Avtogazozapravochnyi kompleks + al'ternativnoe toplivo* [Autogas Complex + Alternative Fuel]. 2011, no. 4, pp. 23–24.
- [6] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Bagrov V.V., Gaivoronskii A.I., Grekhov L.V., Devianin S.N., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Al'ternativnye topliva dlia dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, NITs «Inzhener» publ., Oniko-M publ., 2012. 791 p.
- [7] Fedorenko V.F., Sorokin N.T., Buklagin D.S., Tikhonravov V.S. *Innovatsionnoe razvitie al'ternativnoi energetiki. Ch. 1* [Innovative development of alternative energy: Part 1]. Moscow, Rosinformagrotekh publ., 2010. 348 p.
- [8] Markov V.A., Devianin S.N., Spiridonova L.V. *Perspektivy ispol'zovaniia biotopliv v dizeliakh* [Prospects for the use of biofuels in diesel engines]. *Avtogazozapravochnyi kompleks + Al'ternativnoe toplivo* [Autogas Complex + Alternative Fuel]. 2015, no. 7, pp. 31–38.
- [9] Vasil'ev I.P. *Vliianie topliv rastitel'nogo proiskhozhdeniia na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelia* [Effect of plant fuels for environmental and economic performance of the diesel engine]. Lugansk, Vostochnoukrainskii universitet im. V. Dalia publ., 2009. 240 p.
- [10] Tiu D., Fan S., Dzou Kh. *Proizvodstvo biodizelia iz nepishchevogo syr'ia* [Production of Biodiesel from inedible feedstock]. *Khimiia i tekhnologiia topliv i masel* [Chemistry and Technology of Fuels and Oils]. 2011, no. 2, pp. 17–22.
- [11] Ivashura S.V. *Rynok maslichnykh v novom stoletii* [Oilseeds market in the new century]. *Masla i zhiry* [Oils and fats]. 2011, no. 2, pp. 4–7.

- [12] Godina E.D. Opredelenie stepeni teploty sgoraniia dizel'nogo smesevogo topliva iz soevogo masla [The Determination of the calorific value degree of diesel composite propellant from soybean oil]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova* [Herald of the NEFU named after M.K. Ammosov]. 2013, vol. 10, no. 5, pp. 25–29.
- [13] Morozov Iu.N. Analiz maslozhirovogo rynka Rossii i vozmozhnye perspektivy razvitiia [Analysis of fats and oils market in Russia and the possible prospects of development]. *Masla i zhiry* [Oils and fats]. 2012, no. 7, pp. 4–6.
- [14] Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Shemenov D.S. *Dizel'noe smesevoe toplivo* [Diesel mixed fuel]. Penza, RIO PGSKhA publ., 2012. 147 p.
- [15] Gorbachev M. Al'ternativnye istochniki energii dlia APK [Alternative energy sources for agriculture]. *Sel'skii mekhanizator* [Rural mechanic]. 2007, no. 4, pp. 6–7.
- [16] Rakopoulos C.D., Rakopoulos D.C., Giakoumis E.G., Dimaratos A.M., Founti M.A. Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: sunflower, cottonseed, corn and olive. *Fuel*, 2011, vol. 90, pp. 3439–3446.
- [17] Onyestyák G., Harnos S., Szegedi A., Kalló D. Sunflower oil to green diesel over Raney-type Ni-catalyst. *Fuel*, 2012, vol. 102, pp. 282–288.
- [18] Markov V.A., Devianin S.N., Neverova V.V. Pokazateli toksichnosti otrabotavshikh gazov dizel'nogo dvigatel'ia, rabotaiushchego na mnogokomponentnykh smesevykh biotoplivakh [Toxicity parameters of exhaust gases of diesel engine running on mixed composition bio-fuels]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2015, no. 5, pp. 15–27.
- [19] Vasil'ev F.P. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Moscow, Faktorial Press, 2002. 824 p.
- [20] Parsadanov I.V. *Povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti dizelei na osnove kompleksnogo toplivno-ekologicheskogo kriteriia* [Improving the quality and competitiveness of diesel engines based on an integrated fuel and environmental criteria]. Khar'kov, KhPI publ., 2003. 244 p.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016

Информация об авторах

МАРКОВ Владимир Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

ДЕВЯНИН Сергей Николаевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Тракторы и автомобили». Российский государственный аграрный университет (РГАУ) — МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, Российская Федерация, Тимирязевская ул., д. 58, e-mail: devta@rambler.ru).

КАСЬКОВ Сергей Иосифович (Москва) — старший преподаватель кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kaskov_si@mail.ru).

Information about the authors

MARKOV Vladimir Anatolievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Thermophysics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

DEVYANIN Sergey Nikolaevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Trucks and Tractors Department. Russian State Agrarian University (RSAU) — Timiryazev Moscow Agricultural Academy (127550, Moscow, Russian Federation, Timiryazevskaya St., Bldg. 58, e-mail: devta@rambler.ru).

KASKOV Sergey Iosifovich (Moscow) — Senior Lecturer, Department of Thermophysics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kaskov_si@mail.ru).