

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-7-48-60

Растительные масла как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу

В.А. Марков¹, С.И. Каськов¹, С.С. Лобода²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² Компания TENFLECS, 142191, Троицк, Московская обл., Российская Федерация, ул. Промышленная, д. 26

Vegetable Oils as an Environmentally Safe Additive to Petroleum Diesel Fuel

V.A. Markov¹, S.I. Kaskov¹, S.S. Loboda²¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² TENFLECS, 142191, Troitsk, Moscow Region, Russian Federation, Promyshlennaya St., Bldg. 26

e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru, kaskov_si@mail.ru, st-loboda@yandex.ru



Актуальность статьи обусловлена необходимостью более широкого распространения альтернативных моторных топлив и решения обостряющихся экологических проблем. Проанализированы средства и методы снижения токсичных выбросов с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания. Указаны 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 льняным, горчичным и рыжиковым маслами. Предложена методика оптимизации этих смесей, базирующаяся на определении обобщенного критерия оптимальности, вычисляемого в виде суммы частных критериев, характеризующих концентрацию нормируемых токсичных компонентов в отработавших газах. Выполнены оптимизационные расчеты состава биотоплива для дизеля Д-245.12С. Показано, что с увеличением содержания указанных масел в смеси с нефтяным дизельным топливом параметры токсичности отработавших газов двигателя улучшаются, но даже небольшая добавка растительного масла в такое топливо значительно улучшает эти параметры. Минимальное значение обобщенного критерия оптимальности достигнуто при использовании смеси, содержащей 91 % нефтяного дизельного топлива и 9 % льняного масла.

Ключевые слова: дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, льняное масло, горчичное масло, рыжиковое масло, смесевое биотопливо



This work is conducted in response to the need to advance the use of alternative motor fuels and solve increasing ecological problems. The tools and methods for reducing noxious

emissions in exhaust fumes of internal combustion engines are analysed. The advantages and drawbacks of using alternative fuels such as renewable vegetable oils in diesel engines are outlined. The use of alternative vegetable motor fuels does not only allow replacing petroleum motor fuels but also reduces noxious atmospheric emissions in diesel exhaust fumes. The advisability of using biofuel (that is mixtures of petroleum diesel fuel and vegetable oils) is substantiated. A study to optimize the composition of such biofuels is conducted. Mixtures of petroleum diesel fuel with linseed, mustard and camelina oils are examined, and a method for optimizing the mixtures is proposed. It is based on determining the generalized optimality criterion calculated as a sum of partial criteria that characterize the concentration of standardized noxious elements in the exhaust fumes. Optimization calculations of the biofuel composition for the D-245.12S diesel engine are performed. It is shown that with an increase in the content of the above-mentioned vegetable oils in the petroleum diesel fuel mixtures, toxicity parameters of the exhaust fumes improve, and even a small addition of vegetable oil into the mixture considerably improves these parameters. The minimal value of the generalized optimality criterion is achieved with the mixture containing 91 % of petroleum diesel fuel and 9 % of linseed oil.

Keywords: diesel engine, petroleum diesel fuel, linseed oil, mustard oil, camelina oil, biofuel mixture

Одна из основных задач современного двигателестроения — снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) двигателей внутреннего сгорания [1, 2]. К показателям токсичности ОГ относятся выбросы токсичных компонентов в атмосферу, лимитированные современными нормативными документами на токсичность ОГ двигателей. Нормируемыми токсичными компонентами ОГ дизельных двигателей (далее — дизели) являются оксиды азота NO_x , монооксид углерода CO , легкие несгоревшие углеводороды CH_x и твердые частицы, основой которых служит углерод C (сажа). Выбросы оксидов серы SO_x ограничены косвенно — через содержание серы S в топливе. Динамика ужесточения требований к содержанию в ОГ дизелей нормируемых токсичных компонентов представлена на рис. 1 и 2, а также в табл. 1 [3].

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости внедрения в двигателестроение средств и методов снижения токсичности ОГ дизелей. Разработку мероприятий по уменьшению токсичности ОГ можно проводить по следующим основным направлениям (рис. 3) [4]: совершенствование конструкции двигателя, учет эксплуатационных факторов и применение альтернативных (нетрадиционных) топлив. С этой точки зрения особый интерес представляют биотоплива, отличающиеся хорошими экологическими качествами [5–7].

Среди биотоплив, нашедших наиболее широкое применение в дизелях, следует выделить растительные масла (РМ) и их производные —

метилловый, этиловый и бутиловый эфиры [3, 7, 8]. Несмотря на проблемы, возникающие при эксплуатации дизелей на РМ, продолжают исследования их работы на этих биотопливах и на их смесях с другими топливами, в основном с нефтяным дизельным топливом (ДТ) [7–12].

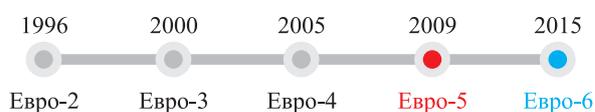


Рис. 1. Динамика ввода в Европе ужесточаемых требований к показателям токсичности ОГ дизелей легковых автомобилей (с полной массой до 3,5 т)

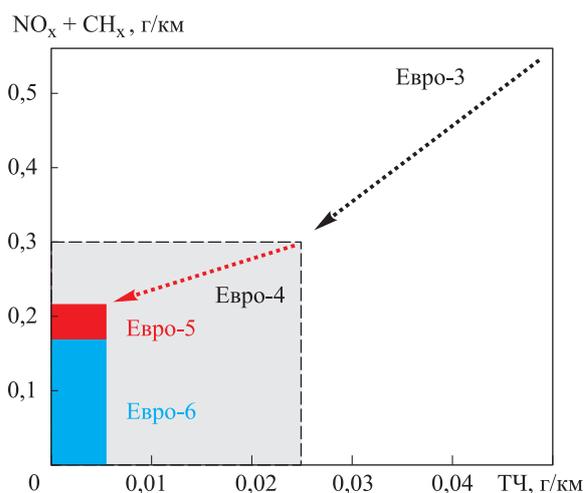


Рис. 2. Нормы вредных выбросов с ОГ дизелей легковых автомобилей в европейском испытательном цикле (ТЧ — твердые частицы, $NO_x + CH_x$ — суммарный выброс оксидов азота и легких несгоревших углеводородов)

Таблица 1

Требования по ограничению содержания вредных веществ в ОГ дизелей транспортного назначения в странах Европы

Нормы на токсичность ОГ	Предельные выбросы вредных веществ с ОГ, мг/км		
	Оксиды азота NO _x	Твердые частицы	Диоксид углерода CO ₂
Евро-4	300	25	160...170
Евро-5	220	5	140
Евро-6	170	5	120

Следует отметить, что использование РМ в качестве сырья для производства биотоплив практически не оказывает влияния на сектор их производства для пищевых целей. В качестве моторного топлива могут выступать технические РМ, полученные путем экстрагирования семян масличных культур или предварительно отжатого жмыха бензином, гексаном или другими экстрагентами. Для технического приме-

нения подходят низкокачественные и просроченные РМ. Значительной сырьевой базой для производства биотоплив являются отработанные для жарки фритюрные масла [13–15]. Масличные культуры, предназначенные для производства биотоплива, можно выращивать на территориях, не пригодных для производства продуктов питания (в районах с неблагоприятной экологической обстановкой, на участках,



Рис. 3. Схема основных средств и методов снижения токсичности ОГ дизелей

прилегающих к автомобильным магистралям и промышленным предприятиям).

При применении РМ и их производных в качестве моторного топлива возможны два пути — централизованное и децентрализованное производство биотоплив [3, 8]. Централизованное производство моторных топлив из РМ заключается в переработке РМ в сложные эфиры (метиловый, этиловый, бутиловый), используемые в дизелях либо как самостоятельные топлива, либо в смеси с нефтяным ДТ. Децентрализованное производство предусматривает применение в качестве моторного топлива «чистых» РМ или их смесей с нефтяным ДТ. Это направление обычно реализуется непосредственно в агропромышленных комплексах, где есть излишки масел и биотопливо можно произвести внутривладельческим способом из собственного сырья. Это позволяет комплексно использовать сельскохозяйственную продукцию и сократить транспортные расходы.

Применение РМ в качестве самостоятельно-го ДТ затруднено из-за различий физико-химических свойств РМ и нефтяного ДТ. Это сопровождается проблемами, возникающими при функционировании дизелей на РМ. К ним относятся плохое качество процессов топливо-подачи и распыливания масел, вызванное их высокими вязкостью и плотностью, а также отмечаемые при длительной работе на этих маслах коксование распылителей и деталей, образующих камеру сгорания, нарушение подвижности поршневых колец. В связи с этим представляется целесообразным использовать РМ как экологическую добавку к нефтяному ДТ [3, 8, 16, 17]. Смеси нефтяного ДТ с небольшой добавкой РМ позволяют решить указанные проблемы.

При анализе возможностей применения различных РМ для производства биотоплив обычно рассматривают рапсовое масло (РапсМ) [3, 8, 16]. Вместе с тем в России выращивают и другие виды РМ. Структура производства РМ в России такова: доля подсолнечного масла (ПМ) в общем объеме российского производства РМ составляет 86,84 %, соевого — 7,96 %, рапсового — 4,84 %, горчичного (ГМ) — 0,11 %, остальных масел (кукурузного, льняного (ЛМ) и др.) — 0,25 % [18].

Цель работы — оценка возможности использования льняного (ЛМ), горчичного (ГМ) и рыжикового (РыжМ) масел в качестве экологической добавки к нефтяному ДТ.

В статьях [19–21] уже приведены результаты исследования отечественного автотракторного дизеля на смесях нефтяного ДТ с этими маслами. Вместе с тем возникает необходимость сравнительного анализа этих данных и оптимизации состава таких смесевых биотоплив.

Лен представляет собой однолетнее (иногда — озимое) растение семейства льновых. Эта традиционная для России сельскохозяйственная культура имеет несколько сортов. Среди них наиболее известны лен-долгунец (отличающийся волокном высокого качества), лен-кудряш (используемый в основном как масличная культура), и лен-межеумок (маслично-волокнистая культура).

Горчица — растение семейства крестоцветных, к которому относятся такие известные сельскохозяйственные культуры, как капуста, редька, редис, репа, рапс и др. К семейству капустных принадлежит и рыжик, представляющий собой однолетнюю траву. Это дикорастущее растение весьма неприхотливо, поэтому оно уже давно обратило на себя внимание селекционеров и сегодня успешно культивируется на полях России и Европы.

Следует отметить, что на физико-химические свойства ЛМ, ГМ и РыжМ оказывают влияние сорт масличной культуры, условия ее выращивания и технология переработки. В то же время свойства разных РМ, во многом схожие, между собой, зависят от состава и строения жиров, которые, в свою очередь, определяются видом растения. Основой всех жиров являются полные сложные эфиры глицерина и высших алифатических кислот [3, 8]. Многие из этих кислот впервые были выделены именно из жиров, поэтому в литературе их часто называют «жирными» кислотами. В составе сложного эфира одна молекула глицерина $C_3H_5(OH)_3$ связана с остатками трех жирных кислот, поэтому такие соединения называют триацилглицеридами. Массовая доля триацилглицеридов в жирах составляет 93...98 %. Остальные вещества, растворенные в жире и попавшие в него в процессе выработки масел, называют сопутствующими.

РМ содержат в основном жирные кислоты с четным числом атомов углерода (C_{14} , C_{16} , C_{18} и др.). При этом в состав РМ входят как ненасыщенные (олеиновая, линолевая, линоленовая и др.), так и насыщенные жирные кислоты (миристиновая, пальмитиновая, стеариновая и др.). В насыщенных жирных кислотах молекулы не имеют двойных связей, а в ненасыщен-

ных присутствуют одна–три двойные связи. Жирнокислотный состав масел основных масличных культур России приведен в табл. 2. Следует отметить, что масличность (массовое

содержание жира) семян льна (до 50 %), горчицы (до 45 %) и рыжика (до 42 %) соизмерима с масличностью семян подсолнечника (до 57 %) и рапса (до 50 %).

Таблица 2

Жирнокислотный состав различных нерафинированных РМ

РМ	Массовая доля, % по массе, жирных кислот РМ					
	насыщенных			ненасыщенных		
	миристиновой C ₁₄ H ₂₈ O ₂ или С 14:0	пальмитино- вой C ₁₆ H ₃₂ O ₂ или С 16:0	стеариновой C ₁₈ H ₃₆ O ₂ или С 18:0	олеиновой C ₁₈ H ₃₄ O ₂ или С 18:1	линолевой C ₁₈ H ₃₂ O ₂ или С 18: 2	линоленовой C ₁₈ H ₃₀ O ₂ или С 18:3
ПМ	0...0,2	5,6...7,6	2,7...6,5	14,0...39,4	18,3...74,0	До 0,3
РапсМ	0...0,2	1,5...6,0	0,5...3,1	8,0...60,0	11,0...23,0	5,0...13,0
ЛМ	5,4...11,3	2,5...8,0	0,4...1,0	13,0...36,0	8,3...30,0	30,0...67,0
ГМ	0...1,0	0,5...4,5	0,5...2,0	8,0...23,0	10,0...24,0	6,0...18,0
РыжМ	0...0,2	5,0...7,0	2,0...2,5	12,0...20,0	12,0...20,0	14,0...22,0

Примечание. После названия жирной кислоты приведены формула состава и условная формула состава, в которой первая цифра соответствует числу атомов углерода, а вторая — числу двойных связей в молекуле.

Таблица 3

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Свойство	Вид топлива									
	ДТ	ЛМ	95 % ДТ + + 5 % ЛМ	91 % ДТ + + 9 % ЛМ	ГМ	95 % ДТ + + 5 % ГМ	90 % ДТ + + 10 % ГМ	РыжМ	95 % ДТ + + 5 % РМ	90 % ДТ + + 10 % РМ
Плотность при температуре 20 °С, кг/м ³	830	912	834	837	920	835	839	910	834	838
Кинематическая вязкость при температуре 20 °С, мм ² /с	3,8	59,0	4,5	6,0	70,0	5,0	7,0	57,7	4,4	5,8
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	37,6	42,2	42,0	37,2	42,1	41,9	37,5	42,2	42,0
Цетановое число	45	38	–	–	35	–	–	37	–	–
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг воздуха/кг топлива	14,31	12,62	14,23	14,16	12,44	14,19	14,11	12,52	14,23	14,13
Содержание, % по массе:										
С	87,0	77,8	86,5	86,2	77,1	86,5	86,0	77,6	86,5	86,1
Н	12,6	12,0	12,6	12,5	11,8	12,5	12,5	11,8	12,6	12,5
О	0,4	10,2	0,9	1,3	11,1	1,0	1,5	10,6	0,9	1,4

Примечание. Прочерк «–» означает, что свойство не определялось; для смесей указано объемное процентное содержание компонентов.

Следует отметить, что жирнокислотный состав ЛМ, ГМ и РыжМ несколько отличается от аналогичного состава ПМ — самого распространенного в России (см. табл. 2). Одно из основных различий заключается в том, что в составе этих масел в большем количестве присутствуют непредельные жирные кислоты. В частности, ЛМ содержит до 67 % по массе линоленовой кислоты, имеющей три ненасыщенные связи, а ПМ — до 0,3 % по массе. В связи с этим ЛМ менее стабильно в окислительных процессах, чем ПМ. Низкая окислительная стабильность (высокая окисляемость) РыжМ обуславливает его ограниченное время хранения. Если срок хранения нерафинированного ПМ составляет 38 недель, то у нерафинированного ЛМ — лишь 26 недель. При этом просроченное ЛМ можно использовать в качестве моторного топлива.

В табл. 3 приведены некоторые физико-химические свойства ЛМ, ГМ, РыжМ и нефтяного ДТ марки Л (летнее) по ГОСТ 305—82. Эти данные свидетельствуют о том, что по физико-химическим свойствам РМ заметно отличаются от нефтяного ДТ. Цетановое число РМ, характеризующее его самовоспламеняемость в камере сгорания (КС) дизеля, несколько ниже, чем у нефтяного ДТ.

Кроме того, РМ заметно отличаются от нефтяного ДТ по фракционному составу. Температура начала кипения РМ очень высока (около 280...300 °С против 180...360 °С у нефтяного ДТ). При атмосферном давлении и температуре более 300 °С разогнать его на отдельные фракции не представляется возможным из-за термического разложения масла.

Одной из серьезных проблем использования РМ в качестве топлива для дизелей является повышенная на порядок вязкость РМ по сравнению с таковой у нефтяного ДТ. Эта характеристика определяет качество распыливания топлива, смесеобразования и последующего сгорания. Теплотворная способность РМ несколько ниже, чем у нефтяного ДТ, поскольку молекулы этих масел содержат значительное количество атомов кислорода (до 12 % по массе, у нефтяного ДТ — 0,4 % по массе).

В связи с этим у РМ удельный эффективный расход заметно больше, чем у нефтяного ДТ, при примерно равной эффективности процесса сгорания (при примерно равном эффективном коэффициенте полезного действия (КПД) двигателя). Вместе с тем содержание в молекулах

РМ значительного количества кислорода, способствующего их окислению при сгорании, благоприятно сказывается на экологических свойствах РМ как моторных топлив. К положительным экологическим свойствам РМ следует отнести пониженное содержание в них серы (0,002 % против 0,2 % у нефтяного ДТ) и практически полное отсутствие полициклических ароматических углеводородов, являющихся канцерогенами.

Для оценки возможности использования исследуемых масел в качестве экологической добавки к нефтяному ДТ проведены испытания дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5). Этот двигатель производства Минского моторного завода установлен на малотоннажных грузовиках ЗиЛ-5301 «Бычок», а его модификации — на автобусах

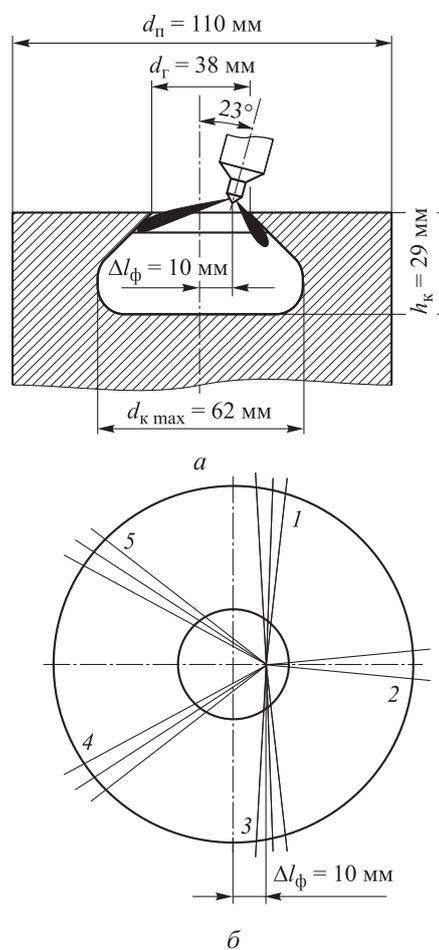


Рис. 4. Схемы КС типа ЦНИДИ дизеля Д-245.12С со схемой расположения форсунки (а) и ориентации струй (1–5) распыливаемого топлива в КС (б):

$d_{k \max}$ и h_k — максимальный диаметр КС в поршне и ее глубина; d_n — диаметр поршня; d_r — диаметр горловины КС; Δl_ϕ — смещение форсунки относительно оси КС

Павловского автомобильного завода и тракторах «Беларусь» Минского тракторного завода. Исследованы смеси нефтяного ДТ и с небольшим количеством (до 10 % по объему) различных РМ. Некоторые свойства этих топлив приведены в табл. 3, а схема КС дизеля Д-245.12С со схемой расположения форсунки — на рис. 4.

Параметры дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5)

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 турбонадува	Турбокомпрессор ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов
Тип КС	ЦНИДИ
Способ смесеобразования	Объемно-плёночный
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	2 400
Номинальная мощность, кВт	80
Система питания	Разделенного типа
ТНВД	Рядный типа РР4М10U1f фирмы Motorpal с всережимным центробежным регулятором
Диаметр плунжеров ТНВД, мм	10
Ход плунжеров ТНВД, мм	10
Длина нагнетательных топливopоводов, мм	540
Тип форсунок	ФДМ-22 производства 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.

Моторный стенд оборудовали комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измеряли с помощью дымомера МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью измерения ± 1 %, а концентрации в ОГ оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , легких несгоревших углеводородов C_nH_x в ОГ — газоанализатором SAE-7532 японской фирмы Yanaco с погрешностями измерения указанных компонентов ± 1 %.

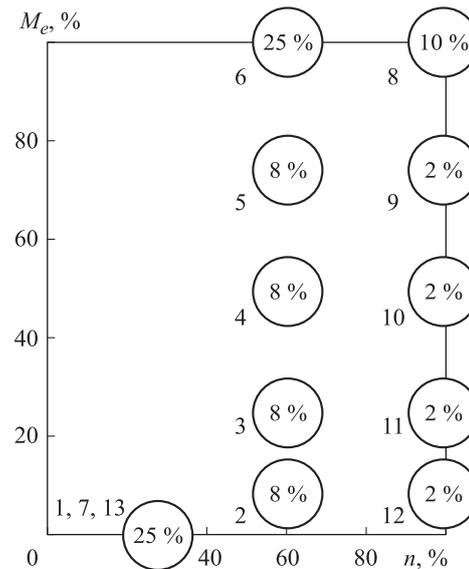


Рис. 5. Стационарный европейский 13-режимный цикл (нормы ECE R49), используемый для оценки токсичности ОГ дизелей автомобилей средней и большой грузоподъемности — с полной массой более 3,5 т (возле каждого режима, обозначенного кружком, показан его номер; внутри кружков приведена доля времени каждого режима в процентах от общего времени эксплуатации); M_e — крутящий момент на валу двигателя, характеризующий нагрузочный режим работы дизеля)

Дизель исследовали в режимах внешней скоростной характеристики и 13-режимного испытательного цикла ECE R49 Правил 49 ЕЭК ООН (Евро-2) с установочным углом опережения впрыскивания топлива $\theta = 13^\circ$ поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки и неизменным положением упора дозирующей рейки ТНВД. Этот испытательный цикл (рис. 5) включает в себя 13 установившихся режимов: три режима холостого хода с минимальной частотой вращения $n = (0,25 \dots 0,3)n_{\text{ном}}$, пять нагрузочных режимов (10; 25; 50; 75; 100 % нагрузки) при номинальной частоте вращения $n_{\text{ном}}$ и пять нагрузочных режимов (10; 25; 50; 75; 100 % нагрузки) при частоте вращения $n_{\text{Mmax}} = 0,6 \dots 0,7 n_{\text{ном}}$, соответствующей максимальному крутящему моменту. Доля номинального режима — 10 % общего времени работы, а доля режима максимального крутящего момента — 25 %. Результаты экспериментальных исследований дизеля приведены в табл. 4.

Анализ результатов экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ и его смесях с РМ, показывает, что задача выбора оптимального состава сме-

Таблица 4

Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ и его смесях с РМ

Показатель	Топливо							
	ДТ	95 % ДТ + 5 % ЛМ	91 % ДТ + 9 % ЛМ	ДТ	95 % ДТ + 5 % ГМ	90 % ДТ + 10 % ГМ	95 % ДТ + 5 % РМ	90 % ДТ + 10 % РМ
Часовой расход топлива G_{τ} , кг/ч	20,10/ 13,10	20,18/ 13,13	20,24/ 13,28	20,00/ 13,00	20,17/ 13,13	20,25/ 13,22	20,19/ 13,16	20,23/ 13,30
Крутящий момент дизеля M_e , Н·м	322/ 368	321/ 366	319/ 367	321/ 364	321/ 366	318/ 363	318/ 363	317/ 358
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)	248,4/ 226,2	250,8/ 228,9	252,1/ 230,1	248,2/ 226,2	250,1/ 228,9	253,4/ 231,9	252,1/ 230,1	253,6/ 235,9
Эффективный КПД дизеля η_e	0,341/ 0,374	0,340/ 0,373	0,340/ 0,373	0,341/ 0,374	0,341/ 0,373	0,339/ 0,370	0,338/ 0,371	0,338/ 0,363
Дымность ОГ K_x , % по шкале Хартриджа	16,0/ 43,0	12,0/ 37,5	11,0/ 36,0	17,0/ 42,0	15,0/ 38,0	12,0/ 36,0	16,0/ 39,0	15,0/ 37,5
Интегральные на режимах 13-режимного цикла (условные) эффективные показатели двигателя:								
эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$, г/(кВт·ч)	247,97	248,72	252,26	244,63	247,17	251,08	250,22	255,57
эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	0,341	0,343	0,340	0,346	0,346	0,342	0,341	0,335
Интегральные на режимах 13-режимного цикла удельные массовые выбросы, г/(кВт·ч):								
оксидов азота e_{NO_x}	7,018	6,230	6,441	5,911	5,760	5,689	5,783	5,341
монооксида углерода e_{CO}	1,723	1,631	1,511	2,184	2,140	2,068	2,127	1,853
несгоревших углеводородов $e_{\text{СН}_x}$	0,788	0,695	0,664	0,675	0,602	0,561	0,660	0,585
<p>Примечания: 1. В числителе указаны значения для режима максимальной мощности, в знаменателе — максимального крутящего момента внешней скоростной характеристики.</p> <p>2. При испытаниях дизеля изменялись его регулировки. Значения, приведенные в первом–третьем столбцах, получены на первом этапе испытаний двигателя на нефтяном ДТ и его смесях с ЛМ, а значения, представленные в четвертом–девятом столбцах, — на втором этапе испытаний дизеля на нефтяном ДТ и его смесях с ГМ и РыжМ (после изменения регулировок).</p>								

севого биотоплива достаточно сложна и не имеет однозначного решения. Это обусловлено тем, что работа дизеля характеризуется целым комплексом показателей (критериев) токсичности ОГ — нормируемыми выбросами оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , легких несгоревших углеводородов СН_x и твердых частиц или сажи (углерода) С (дымностью ОГ). Требования к выбору оптимального по данным критериям состава топлива часто противоречат друг другу. В результате задача выбора оптимального состава смесового биотоплива стано-

вится многокритериальной оптимизационной задачей [4, 22].

Известны различные методики решения многокритериальных задач оптимизации, классифицируемые в зависимости от числа оптимизируемых параметров, количества критериев оптимальности, особенностей их задания и определения степени их значимости. Применительно к задаче оптимизации состава смесовых топлив разработаны методики, приведенные в работах [3, 4, 8], которые основаны на одном из наиболее эффективных методов оптимизации

ции — методе свертки, где обобщенный критерий оптимальности формируется в виде суммы частных критериев.

В данной работе предложена методика оптимизации состава смесового биотоплива — смесей нефтяного ДТ с исследуемыми РМ, построенная на составлении обобщенного аддитивного критерия оптимальности

$$J_o = a_{NO_x} J_{NO_x} + a_{CO} J_{CO} + a_{CH_x} J_{CH_x} + a_{K_x} J_{K_x}, \quad (1)$$

где J_{NO_x} , J_{CO} , J_{CH_x} , J_{K_x} — частные критерии оптимальности по выбросам соответственно оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , легких несгоревших углеводородов CH_x и сажи S (дымности ОГ K_x); a_{NO_x} , a_{CO} , a_{CH_x} , a_{K_x} — весовые коэффициенты частных критериев оптимальности.

Указанные весовые коэффициенты выбраны с учетом данных работы [4], в которой токсикологическая значимость токсичных компонентов ОГ — NO_x , CO , CH_x , сажи (дымность ОГ) — оценивают как отношение 1:41,1:1:3,16:200. С учетом этих данных выражение (1) принимает вид

$$J_o = 41,1J_{NO_x} + 1,0J_{CO} + 3,16J_{CH_x} + 200J_{K_x}. \quad (2)$$

Частные критерии оптимальности, входящие в выражения (1) и (2), предложено определять на каждом i -м режиме с использованием соотношений

$$\begin{aligned} J_{NO_x} &= e_{NO_x i} / e_{NO_x ДТ}; J_{CO} = e_{CO i} / e_{CO ДТ}; \\ J_{CH_x} &= e_{CH_x i} / e_{CH_x ДТ}; J_{K_x} = K_{xi} / K_{x ДТ}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $e_{NO_x i}$, $e_{CO i}$, $e_{CH_x i}$, K_{xi} — параметры дизеля, работающего на i -м топливе; $e_{NO_x ДТ}$, $e_{CO ДТ}$, $e_{CH_x ДТ}$, $K_{x ДТ}$ — параметры дизеля, работающего на нефтяном ДТ.

В выражениях (1) и (2) использованы значения интегральных выбросов токсичных компонентов в режимах 13-режимного испытательного цикла ECE R49 и значения дымности ОГ в режиме максимального крутящего момента внешней скоростной характеристики, которые являются наиболее критичными. При этом учтено, что топливная экономичность исследуемого дизеля сравнительно слабо меняется при изменении состава рассматриваемых биотоплив. При переходе от нефтяного ДТ к его смесям с небольшим содержанием РМ (до 10 %) условный эффективный КПД дизеля $\eta_{усл}$ в режимах 13-режимного цикла изменяется в пределах не более 3 % (см. табл. 4). Поэтому при анализе свойств этих топлив можно применять обобщенный критерий оптимальности, учитывающий только показатели токсичности ОГ. Этот обобщенный критерий оптимальности (2) также удобно использовать в относительном виде

$$\bar{J}_o = J_{oi} / J_{o ДТ}. \quad (4)$$

Таблица 5

Оптимизация состава смесей нефтяного ДТ с РС для дизеля Д-245.12С

Вид топлива	Показатель дизеля									
	e_{NO_x}	J_{NO_x}	e_{CO}	J_{CO}	e_{CH_x}	J_{CH_x}	K_x	J_{K_x}	J_o	\bar{J}_o
<i>Смеси нефтяного ДТ с ЛМ</i>										
ДТ	7,018	1,000	1,723	1,000	0,748	1,000	43,0	1,000	245,26	1,000
95 % ДТ + 5 % ЛМ	6,230	0,888	1,631	0,947	0,695	0,929	37,5	0,872	214,78	0,876
91 % ДТ + 9 % ЛМ	6,441	0,918	1,511	0,877	0,664	0,888	36,0	0,837	208,81	0,851
<i>Смеси нефтяного ДТ с ГМ</i>										
ДТ	5,911	1,000	2,184	1,000	0,675	1,000	42,0	1,000	245,26	1,000
95 % ДТ + 5 % ГМ	5,760	0,974	2,140	0,980	0,602	0,892	38,0	0,905	224,83	0,917
90 % ДТ + 10 % ГМ	5,689	0,962	2,068	0,947	0,561	0,831	36,0	0,857	214,51	0,875
<i>Смеси нефтяного ДТ с РыжМ</i>										
ДТ	5,911	1,000	2,184	1,000	0,675	1,000	42,0	1,000	245,26	1,000
95 % ДТ + 5 % РМ	5,783	0,978	2,127	0,974	0,660	0,978	39,0	0,929	230,06	0,938
90 % ДТ + 10 % РМ	5,341	0,904	1,853	0,848	0,585	0,867	37,5	0,893	219,34	0,894

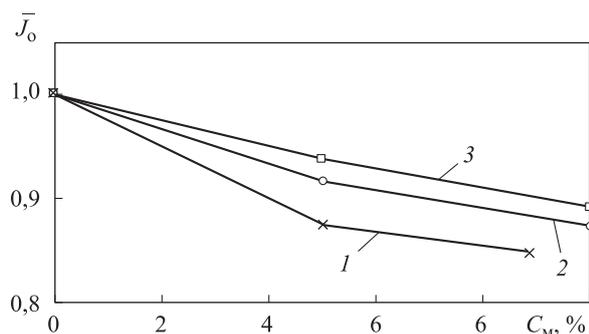


Рис. 6. Зависимость обобщенного критерия оптимальности \bar{J}_0 от объемного содержания C_M льняного (1), горчичного (2) и рыжикового (3) масел в смеси с нефтяным ДТ

При решении оптимизационной задачи с помощью выражений (2) и (4) обобщенный критерий оптимальности J_0 минимизируется.

Предложенная методика применена для оптимизации состава смесей нефтяного ДТ с РМ (ЛМ, ГМ, РапсМ) в дизеле Д-245.12С. При этом использованы экспериментальные данные табл. 4. Результаты расчета частных критериев оптимальности по выражениям (3) и обобщенного критерия оптимальности по формулам (2) и (4) приведены в табл. 5.

Результаты оптимизации свидетельствуют о том, что для дизеля Д-245.12С, работающего на исследованных смесях, при росте содержания рассматриваемых масел в смеси с нефтяным ДТ значения обобщенного критерия оптимальности \bar{J}_0 монотонно уменьшаются. При работе на нефтяном ДТ обобщенный критерий \bar{J}_0 равен единице, а минимальное значение обобщенного критерия оптимальности ($\bar{J}_0 = 0,851$) достигнуто при использовании смеси 91 % нефтяного ДТ и 9 % ЛМ.

Обращает на себя внимание и тот факт, что по мере увеличения содержания РМ в смеси с нефтяным ДТ обобщенный критерий оптимальности \bar{J}_0 постоянно падает, но его снижение наиболее заметно при небольшом содержании РМ в смесевом биотопливе (см. рис. 5). В частности, при переводе дизеля Д-245.12С с нефтяного ДТ на смесь 95 % ДТ + 5 % ЛМ обобщенный критерий оптимальности \bar{J}_0 уменьшается с 1,000 до 0,876, а дальнейший рост C_M до 9 % приводит к снижению \bar{J}_0 лишь до 0,851. Это свидетельствует о том, что даже небольшая добавка растительного масла в

нефтяное ДТ значительно улучшает показатели токсичности ОГ исследуемого дизеля.

Выводы

1. Показана целесообразность применения РМ в качестве экологической добавки к нефтяному ДТ. При этом рассмотрены смеси нефтяного ДТ с льняным, горчичным и рыжиковым маслами.

2. Анализ результатов испытаний дизеля Д-245.12С на смесях нефтяного ДТ с этими маслами подтвердил возможность улучшения показателей токсичности ОГ — снижения выбросов всех нормируемых токсичных компонентов ОГ: оксидов азота, монооксида углерода, легких несгоревших углеводородов и дымности ОГ.

3. Предложена методика оптимизации состава смесей РМ с нефтяным ДТ, базирующаяся на определении обобщенного критерия оптимальности в виде суммы частных критериев оптимальности, характеризующих выбросы нормируемых токсичных компонентов ОГ дизелей.

4. Результаты оптимизации свидетельствуют о том, что для дизеля Д-245.12С, работающего на исследованных смесях, при росте содержания РМ в смеси с нефтяным ДТ обобщенный критерий оптимальности монотонно уменьшается. Его минимальное значение $\bar{J}_0 = 0,851$ достигнуто при использовании смеси 91 % нефтяного ДТ и 9 % ЛМ. Даже небольшая добавка РМ в нефтяное ДТ значительно улучшает показатели токсичности ОГ этого дизеля.

5. Проведенные исследования подтвердили эффективность использования предложенной методики оптимизации состава смесевых биотоплива, ее информативность при оценке экологических качеств смесевых топлив разного состава и сравнительно небольшой объем вычислений.

6. Результаты исследований позволяют сделать вывод об эффективности применения смесей нефтяного ДТ с РМ в дизелях различного назначения. В первую очередь, это двигатели сельскохозяйственных машин, в которых можно использовать смеси нефтяного ДТ с техническими, низкосортными, просроченными и фритюрными маслами.

Литература

- [1] Орстик Л.С., Сорокин Н.Т., Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Мишууров Н.П., Тихонравов В.С. *Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития*. Москва, ФГНУ «Росинформагротех», 2008, 404 с.
- [2] Кульчицкий А.Р. *Токсичность автомобильных и тракторных двигателей*. Владимир, Изд-во Владимирского государственного университета, 2000. 256 с.
- [3] Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М. *Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания*. Москва, НИЦ Инженер, 2016. 292 с.
- [4] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
- [5] Васильев И.П. *Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля*. Луганск, Изд-во Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, 2009. 240 с.
- [6] Патрахальцев Н.Н. *Повышение экономических и экологических качеств двигателей внутреннего сгорания на основе применения альтернативных топлив*. Москва, Изд-во РУДН, 2008. 267 с.
- [7] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. *Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания*. Москва, Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
- [8] 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.
- [9] Babu A.K., Devaradjane G. Vegetable Oils and their Derivatives as Fuels for CI Engines: an Overview. *SAE Technical Paper Series*, 2003, no. 2003-01-0767, pp. 1–18.
- [10] Yoshimoto Y., Onodera M., Tamaki H. Performance and Emission Characteristics of Diesel Engines Fueled by Vegetable Oils. *SAE Technical Paper Series*, 2001, no. 2001-01-1807/4227, pp. 1–8.
- [11] Spessert B.M., Arendt I., Schelcher A. Influence of RME and Vegetable Oils on Exhaust Gas and Noise Emissions of Small Industrial Diesel Engines. *SAE Technical Paper Series*, 2004, no. 2004-32-0070, pp. 1–15.
- [12] Lapuerta M., Armas O., Ballesteros R. Diesel Particulate Emissions from Biofuels Derived from Spanish Vegetable Oils. *SAE Technical Paper Series*, 2002, no. 2002-01-1657, pp. 1–7.
- [13] Hamasaki K., Tajima H., Takasaki K., Satohira K., Enomoto M., Egawa H. Utilization of Waste Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel. *SAE Technical Paper Series*, 2001, no. 2001-01-2021, pp. 1–6.
- [14] Morimune T., Yamaguchi H., Konishi K. Exhaust Emissions and Performance of Diesel Engine Operating on Waste Food-Oil. *Transactions of the JSME. Ser. B*, 2000, vol. 66, no. 641, pp. 294–299.
- [15] Lois E., Sendari A., Fragioudakis K., Kalligeros S., Stournas S. Impact of Using Biodiesels of Different Origin and Additives on the Performance of a Stationary Diesel Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, vol. 122, no. 4, pp. 624–631.
- [16] Lotko W., Longwic R., Swat M. The Effect of Rape Oil – Diesel Oil Mixture Composition on Particulate Matter Emission Level in Diesel Engine. *SAE Technical Paper Series*, 2001, no. 2001-01-3388, pp. 1–4.
- [17] Патрахальцев Н.Н., Савастенко А.А. *Применение в дизелях нетрадиционных топлив, как добавок к основному*. Москва, Изд-во Легион-Автодата, 2014. 162 с.
- [18] Федоренко В.Ф., Сорокин Н.Т., Буклагин Д.С., Мишууров Н.П., Тихонравов В.С. *Инновационное развитие альтернативной энергетики. Ч. 1*. Москва, ФГНУ Росинформагротех, 2010. 348 с.
- [19] Марков В.А., Девянин С.Н., Спиридонова Л.В. Экспериментальные исследования дизеля, работающего на смесях дизельного топлива и льняного масла. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2015, № 3, с. 55–64.
- [20] Марков В.А., Са Бовэнь, Неверов В.А., Зыков С.А. Горчичное масло как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу. *Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо*, 2017, т. 16, № 1, с. 10–21.

- [21] Марков В.А., Лобода С.С., Инь Мин. Использование смесей нефтяного дизельного топлива и рыжикового масла в качестве моторного топлива. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2017, № 5, с. 29–40.
- [22] Аббасов М.Э. *Методы оптимизации*. Санкт-Петербург, Изд-во «ВВМ», 2014. 64 с.

References

- [1] Orsik L.S., Sorokin N.T., Fedorenko V.F., Buklagin D.S., Mishurov N.P., Tikhonravov V.S. *Bioenergetika: mirovoi opyt i prognozy razvitiia* [Bioenergetics: global experience and projected growth]. Moscow, FGNU Rosinformagrotekh publ., 2008. 404 p.
- [2] Kul'chitskii A.R. *Toksichnost' avtomobil'nykh i traktornykh dvigatelei* [The toxicity of automobile and tractor engines]. Vladimir, Vladimir State University publ., 2000. 256 p.
- [3] Markov V.A., Devianin S.N., Zykov S.A., Gaidar S.M. *Biotopliva dlia dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Biofuel for internal combustion engines]. Moscow, NITs Inzhener publ., 2016. 292 p.
- [4] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelei* [Toxicity of exhaust gases of diesel engines]. Moscow, Bauman Press, 2002. 376 p.
- [5] Vasil'ev I.P. *Vliianie topliv rastitel'nogo proiskhozhdeniia na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelia* [Impact of vegetable-based fuels on the environmental and economic performance of diesel]. Lugansk, Vostochnoukrainskii universitet im. V. Dalia publ., 2009. 240 p.
- [6] Patrakhal'tsev N.N. *Povyshenie ekonomicheskikh i ekologicheskikh kachestv dvigatelei vnutrennego sgoraniia na osnove primeneniia al'ternativnykh topliv* [Improving the economic and environmental performance of internal combustion engines through the use of alternative fuels]. Moscow, RUDN publ., 2008. 267 p.
- [7] Lotko V., Lukanin V.N., Khachiian A.S. *Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigateliakh vnutrennego sgoraniia* [The use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, MADI (TU) publ., 2000. 311 p.
- [8] 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 on their basis for diesel engines]. Moscow, NITs Inzhener publ., Oniko-M publ., 2011. 536 p.
- [9] Babu A.K., Devaradjane G. Vegetable Oils and their Derivatives as Fuels for CI Engines: an Overview. *SAE Technical Paper Series*, 2003, no. 2003-01-0767, pp. 1–18.
- [10] Yoshimoto Y., Onodera M., Tamaki H. Performance and Emission Characteristics of Diesel Engines Fueled by Vegetable Oils. *SAE Technical Paper Series*, 2001, no. 2001-01-1807/4227, pp. 1–8.
- [11] Spessert B.M., Arendt I., Schelcher A. Influence of RME and Vegetable Oils on Exhaust Gas and Noise Emissions of Small Industrial Diesel Engines. *SAE Technical Paper Series*, 2004, no. 2004-32-0070, pp. 1–15.
- [12] Lapuerta M., Armas O., Ballesteros R. Diesel Particulate Emissions from Biofuels Derived from Spanish Vegetable Oils. *SAE Technical Paper Series*, 2002, no. 2002-01-1657, pp. 1–7.
- [13] Hamasaki K., Tajima H., Takasaki K., Satohira K., Enomoto M., Egawa H. Utilization of Waste Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel. *SAE Technical Paper Series*, 2001, no. 2001-01-2021, pp. 1–6.
- [14] Morimune T., Yamaguchi H., Konishi K. Exhaust Emissions and Performance of Diesel Engine Operating on Waste Food-Oil. *Transactions of the JSME. Ser. B*, 2000, vol. 66, no. 641, pp. 294–299.
- [15] Lois E., Sendari A., Fragioudakis K., Kalligeros S., Stournas S. Impact of Using Biodiesels of Different Origin and Additives on the Performance of a Stationary Diesel Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, vol. 122, no. 4, pp. 624–631.
- [16] Lotko W., Longwic R., Swat M. The Effect of Rape Oil – Diesel Oil Mixture Composition on Particulate Matter Emission Level in Diesel Engine. *SAE Technical Paper Series*, 2001, no. 2001-01-3388, pp. 1–4.
- [17] Patrakhal'tsev N.N., Savastenko A.A. *Primenenie v dizeliakh netraditsionnykh topliv, kak dobavok k osnovnomu* [Application in diesel engines of nonconventional fuels as additives to the main]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2014. 162 p.

- [18] Fedorenko V.F., Sorokin N.T., Buklagin D.S., Mishurov N.P., Tikhonravov V.S. *Innovatsionnoe razvitie al'ternativnoi energetiki. Ch. 1* [Innovative development of alternative energy. Pt. 1]. Moscow, Rosinformagrotekh publ., 2010. 348 p.
- [19] Markov V.A., Devianin S.N., Spiridonova L.V. Eksperimental'nye issledovaniia dizelia, rabotaiushchego na smesiakh dizel'nogo topliva i l'nianogo masla [Experimental research of diesel engine running on oil diesel fuel and linseed oil mixtures]. *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport]. 2015, no. 3, pp. 55–64.
- [20] Markov V.A., Sa Boven', Neverov V.A., Zykov S.A. Gorchichnoe maslo kak ekologicheskaiia dobavka k neftianomu dizel'nomu toplivu [Mustard oil as an ecological additive to petroleum diesel fuel]. *Avtogazozapravochnyi kompleks + al'ternativnoe toplivo* [Autogas filling complex + Alternative fuel]. 2017, vol. 16, no. 1, pp. 10–21.
- [21] Markov V.A., Loboda S.S., In' Min. Ispol'zovanie smesei neftianogo dizel'nogo topliva i ryzhikovogo masla v kachestve motornogo topliva [The Use of Blends of Petroleum Diesel Fuel and Camelina Oil as a Motor Fuel]. *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport]. 2017, no. 5, pp. 29–40.
- [22] Abbasov M.E. *Metody optimizatsii* [Optimization method]. Sankt-Petersburg, VVM publ., 2014. 64 p.

Статья поступила в редакцию 11.04.2018

Информация об авторах

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

ЛОБОДА Станислав Сергеевич (Троицк) — инженер-технолог. Компания TENFLECS (142191, Троицк, Московская обл., Российская Федерация, ул. Промышленная, д. 26, e-mail: st-loboda@yandex.ru).

Information about the authors

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

LOBODA Stanislav Sergeevich (Troitsk) — Manufacturing Process Engineer. TENFLECS (142191, Troitsk, Moscow Region, Russian Federation, Promyshlennaya St., Bldg. 26, e-mail: st-loboda@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марков В.А., Каськов С.И., Лобода С.С. Растительные масла как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 7, с. 48–60, doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-48-60.

Please cite this article in English as:

Markov V.A., Kaskov S.I., Loboda S.S. Vegetable Oils as an Environmentally Safe Additive to Petroleum Diesel Fuel. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 7, pp. 48–60, doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-48-60.