

# Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.436

## Смесевое биотопливо с добавкой льняного масла для дизельных двигателей

В.А. Марков<sup>1</sup>, С.Н. Девянин<sup>2</sup>, В.Л. Трифонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

<sup>2</sup> Московский государственный агроинженерный университет (МГАУ) им. В.П. Горячкина, 127550, Москва, Российская Федерация, Тимирязевская ул., 58

## Blended Biofuel with Linseed Oil for Diesel Engines

V.A. Markov<sup>1</sup>, S.N. Devyanin<sup>2</sup>, V.L. Trifonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

<sup>2</sup> Goryachkin Moscow State Agro-Engineering University (MGAU), 127550, Moscow, Russian Federation, Timiryazevskaya St., 58

@ e-mail: markov@power.bmstu.ru, devta@rambler.ru

**i** Рассмотрены особенности использования в дизельных двигателях биотоплив, получаемых с использованием льняного масла, физико-химические свойства нефтяного дизельного топлива, льняного масла, а также их смесей в различных пропорциях. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С, работающего на смесях дизельного топлива и льняного масла. Найдена зависимость показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов от состава смесевое биотоплива, на основе которой предложена методика оптимизации состава смесевое биотоплива. Эта методика базируется на составлении мультипликативного обобщенного критерия оптимальности в виде произведения двух частных критериев, один из которых характеризует условный эффективный КПД дизеля, а второй — удельные массовые выбросы оксидов азота. Определен оптимальный состав смесевое биотоплива.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, дизельное топливо, льняное масло, смесевое биотопливо, оптимизация.

**i** The study examines specific features of biodiesels made with linseed oil, physicochemical characteristics of petrodiesels, linseed oil, and their combinations in various proportions. The results of experimental studies of a D-245.12C type diesel engine operating on blends of conventional diesel fuel and linseed oil are presented. A relationship between the fuel efficiency and exhaust fume toxicity, and the composition of the blended biofuel has been determined, based on which a method for optimization of the blended biofuel composition has been proposed. The method is based on composing a multiplicative generalized optimization criterion as the product of two partial criteria. The first criterion characterizes the conditional efficiency coefficient of the diesel engine, while the second one refers to nitrogen oxide mass emissions per unit. The optimal composition of the blended biofuel has been determined.

**Keywords:** diesel engine, diesel fuel, linseed oil, blended biofuel, optimization.

Альтернативные моторные топлива находят все большее применение в двигателях наземного транспорта, сельскохозяйственных машин, судов речного и морского флота [1]. Это связано с истощением нефтяных месторождений, ростом цен на нефтепродукты, ужесточением требований к экологическим показателям дизельных двигателей. Одной из наиболее перспективных сырьевых баз для производства альтернативных видов топлива для дизельных двигателей являются растительные масла [2]. В последние годы рынок растительных масел отличался значительным ростом: так, в 2000 г. мировой объем производства растительных масел достиг уровня 80 млн т в год, а к 2013 г. — до 150 млн т. Источником растительных масел являются масличные культуры, содержащие в различных своих частях (главным образом в семенах или плодах) растительные жиры. К масличным культурам относятся более 150 видов растений, способных вырабатывать масла. Различают собственно масличные растения (соя, подсолнечник, рапс) и растения, масла которых являются побочным продуктом при их промышленном использовании (хлопчатник, лен-долгунец, конопля).

Традиционной сельскохозяйственной культурой в России является лен [3–6]. Наибольшее распространение получили три вида льна: лен обыкновенный (лен-долгунец) — отличается волокном высокого качества; лен-кудряш — используется в основном как масличная культура; лен-межеумок (промежуточный) — является маслично-волокнистой культурой. В семенах современных сортов масличного льна содержится до 50 % и выше растительного масла. Лен масличный — одна из древнейших сельскохозяйственных культур, занимающая в мире на сегодняшний день площади около 2,5...2,8 млн га. Основными производителями масличного льна являются Канада, Китай, США, Индия, Эфиопия, Россия, Франция, Бангладеш, Великобритания и Аргентина [3]. Масло льна

используется как пищевое и в то же время оно является одним из лучших высыхающих масел и имеет широкое техническое применение, в частности его применяют в качестве моторного топлива.

Возможность использования растительных масел в качестве моторных топлив определяется составом и строением их молекул. Эти масла состоят главным образом (на 95...97 %) из триацилглицеринов — органических соединений, сложных эфиров глицерина и различных жирных кислот [2, 7]. Растительные масла содержат в основном жирные кислоты с четным числом атомов углерода (например, C<sub>14</sub>, C<sub>16</sub>, C<sub>18</sub> и др.). При этом в состав растительных масел входят как ненасыщенные жирные кислоты (олеиновая, линолевая и др.), так и насыщенные жирные кислоты (миристиновая, пальмитиновая, стеариновая и др.). Молекулы насыщенных жирных кислот не имеют двойных связей, а в ненасыщенных жирных кислотах присутствуют одна-три двойные связи.

Жирнокислотный состав льняного масла несколько отличается от аналогичного состава наиболее распространенного в России подсолнечного масла (табл. 1) [5]. Так, если подсолнечное масло богато линолевой кислотой, то льняное масло — линоленовой кислотой, имеющей три ненасыщенные связи. В связи с этим льняное масло менее стабильно в окислительных процессах по сравнению с подсолнечным маслом [5, 6]. Низкая окислительная стабильность (высокая окисляемость) льняного масла обуславливает его ограниченное время хранения. Если срок хранения подсолнечного нерафинированного масла составляет 38 недель, то у льняного нерафинированного масла — лишь 26 недель, однако просроченное льняное масло может быть использовано в качестве моторного топлива.

Целью предлагаемого исследования являлся анализ показателей автотракторного дизельного двигателя, работающего на смесях в различных

Таблица 1

Жирнокислотный состав подсолнечного и льняного масел

Растительные масла	Массовая доля жирных кислот растительных масел					
	миристиновой C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub> или C 14:0	пальмитиновой C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> или C 16:0	стеариновой C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> или C 18:0	олеиновой C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> или C 18:1	линолевой C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> или C 18:2	линоленовой C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> или C 18:3
Подсолнечное	До 0,2	5,6–7,6	2,7–6,5	14,0–39,4	18,3–74,0	До 0,2
Льняное	5,4–11,3	2,5–8,0	0,4–1,0	13,0–36,0	8,3–30,0	30,0–67,0

*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.

пропорциях нефтяного дизельного топлива (ДТ) и льняного масла (ЛМ). При этом исследовано льняное нерафинированное масло производства ООО «Аромавита» (Московская обл., Подольский р-он, пос. Курилово), а также его смеси с нефтяным ДТ марки Л по ГОСТ 305–82, содержащие 5 и 9 % (по объему) льняного масла. Некоторые физико-химические свойства дизельного топлива, льняного масла и указанных смесей представлены в табл. 2.

По сравнению с нефтяным ДТ льняное масло отличается заметно большими плотностью и вязкостью, поэтому целесообразна работа дизельного двигателя на смесях ДТ и ЛМ. Эти компоненты хорошо смешиваются между собой, образуя стабильные смеси. Путем подбора состава смесевое топливо можно достичь приемлемых физических свойств смеси. Рассматриваемые смесевые биотоплива, содержащие 5 и 9 % ЛМ, также имеют повышенные плотность и вязкость, но они более близки к аналогичным свойствам ДТ (см. табл. 2). Такие отличия физических свойств ЛМ, а также его смесей с ДТ от свойств ДТ оказывают влияние на параметры процесса топливоподачи дизеля, характеристики распыливания топлива и смесеобразования. Указанные смесевые биотоплива отлича-

ются от нефтяного ДТ и по ряду других физико-химических свойств — температуре самовоспламенения, цетановому числу, теплотворной способности (низшей теплоте сгорания) и др. Все эти факторы сказываются на показателях топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) дизельного двигателя, работающего на указанных видах топливах.

Следует также отметить, что среди растительных масел льняное масло наряду с рапсовым имеет наилучшие низкотемпературные свойства (температура застывания  $t_z = -20$  °С). Тем не менее такая температура выше температуры застывания нефтяного ДТ ( $t_{z, ДТ} = -35$  °С). Это необходимо учитывать при организации зимней эксплуатации транспортных средств, работающих на топливах, содержащих данные растительные масла.

Известен ряд работ, посвященных использованию льняного масла в качестве моторного топлива для дизельных двигателей, как в чистом виде [8–10], так и после выработки из него метилового эфира [11–14]. В связи с указанными отличиями физико-химических свойств ЛМ от ДТ целесообразно применение дизельных двигателей на смесях ДТ и ЛМ. Вместе с тем вопрос о применении смесей ДТ и ЛМ в качестве топлива

Таблица 2

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Свойства	Вид топлива			
	ДТ	ЛМ	Смесь 95 % ДТ и 5 % ЛМ	Смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	912	834	837
Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с:				
при 20 °С	3,8	59,6	4,5	6,0
при 40 °С	2,3	23,9	—	—
Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma$ при 20 °С, мН/м	27,1	30,0	—	—
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42 500	37 600	42 200	42 000
Цетановое число	45	38	—	—
Температура самовоспламенения, °С	250	300	—	—
Температура помутнения, °С	-25	-12	—	—
Температура застывания, °С	-35	-20	—	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,62	14,23	14,16
Массовая доля содержания элементов, %:				
углерода	87,0	77,8	86,54	86,17
водорода	12,6	12,0	12,57	12,55
кислорода	0,4	10,2	0,89	1,28
Массовое содержание серы, %	0,20	0,002	0,190	0,182

Примечание. «—» — свойства не определялись; для смесей указано объемное процентное содержание компонентов.

для отечественных автотракторных дизелей является недостаточно изученным. Для подтверждения возможности использования этих смесей в качестве моторного топлива проведены экспериментальные исследования дизельного двигателя типа Д-245.12С (4ЧН 11/12,5) Минского моторного завода, устанавливаемого на малотоннажные грузовые автомобили ЗиЛ-5301 «Бычок», а также автобусы Павловского автобусного завода (ПАЗ) и на тракторы «Беларусь». Некоторые параметры исследуемого дизеля приведены ниже:

Тип двигателя	Четырехтактный, рядный, дизельный
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра $D$ , мм	110
Ход поршня $S$ , мм	125
Общий рабочий объем $iV_h$ , л	4,32
Степень сжатия $\epsilon$	16,0
Номинальная частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	2 400
Номинальная мощность $N_e$ , кВт	80
Система охлаждения	Водяная, принудительная
Фильтр масляный	Сетчатый
Насос масляный	Шестеренчатый
Система питания	Разделенного типа
Диаметр плунжеров ТНВД $d_{пл}$ , мм	10
Ход плунжеров ТНВД $h_{пл}$ , мм	10
Длина нагнетательных топливопроводов $L_T$ , мм	540
Давление начала впрыскивания форсунок $p_f$ , Мпа	21,5

Система турбонаддува двигателя оснащена турбокомпрессором ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов. Камера сгорания — ЦНИДИ с объемно-пленочным смесеобразованием. Двигатель имеет механизм газораспределения клапанного типа с верхним расположением клапанов. Система смазки — принудительная, с разбрызгиванием; топливный насос высокого давления (ТНВД) рядного типа РР4М10U1f фирмы Motorpal с всережимным центробежным регулятором; форсунки типа ФДМ-22 производства ОАО «Куроаппаратура» (Вильнюс); распылители форсунок фирмы Motorpal типа DOP 119S534 с пятью сопловыми отверстиями диаметром  $d_p = 0,34$  мм и проходным сечением  $\mu_p f_p = 0,250$  мм<sup>2</sup>.

Дизельный двигатель исследован на моторном стенде АМО «ЗиЛ» на режимах внешней скоростной характеристики и 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН. Настройки двигателя по установочному углу опережения впрыскивания топлива (13° поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки) и положению упора дозирующей рейки

(упора максимальной подачи топлива) оставались неизменными при использовании всех рассматриваемых видов топлива. Моторный стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ . Концентрации  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH_x$  в ОГ определялись газоанализатором SAE-7532 японской фирмы Yapano с погрешностями измерения указанных компонентов  $\pm 1\%$ .

На первом этапе исследований проведены испытания дизеля типа Д-245.12С на нефтяном ДТ и на смеси 91 % ДТ и 9 % ЛМ на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ). Результаты этих исследований представлены на рис. 1.

Как отмечено ранее, плотность и вязкость исследуемого биотоплива несколько выше ДТ (см. табл. 2), поэтому отмечено небольшое увеличение часового расхода топлива  $G_T$  и некоторое уменьшение коэффициента избытка возду-

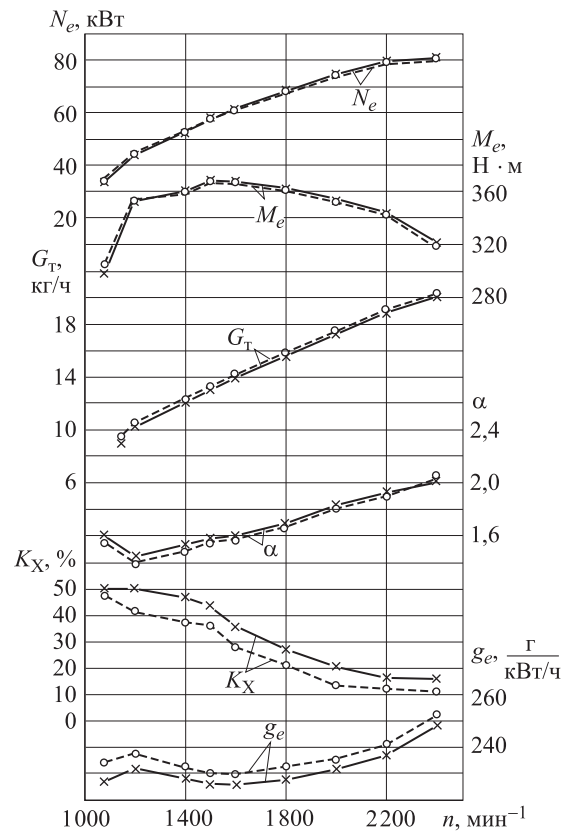


Рис. 1. Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , часового расхода топлива  $G_T$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  дизеля типа Д-245.12С от частоты вращения  $n$  коленчатого вала на режимах ВСХ при использовании различных топлив: — — ДТ; - - - смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ

ха  $\alpha$ . Однако крутящий момент двигателя  $M_e$  и его эффективная мощность  $N_e$  изменились незначительно (см. рис. 1 и табл. 3). В то же время из-за наличия в молекулах ЛМ атомов кислорода теплотворная способность смесевое биотоплива была несколько ниже теплотворной способности ДТ. Это привело к тому, что при использовании смеси 91 % ДТ и 9 % ЛМ 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 смесевое биотопливо на режиме максимальной мощности с частотой вращения коленчатого вала  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  удельный эффективный расход топлива  $g_e$  увеличился с 248,4 до 252,1 г/(кВт·ч), а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  — с 226,2 до 230,1 г/(кВт·ч). Но при этом эффективный КПД дизеля  $\eta_e$  на этих режимах практически не изменялся (см. табл. 3).

Вместе с тем наличие в молекулах ЛМ атомов кислорода привело к заметному уменьше-

нию дымности ОГ дизеля, работающего на смесевом биотопливе. Так, на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  переход с ДТ на смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ сопровождался снижением дымности ОГ  $K_X$  с 16 до 11 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  — с 43 до 36 % по шкале Хартриджа.

На втором этапе проведены исследования на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН, результаты которых представлены на рис. 2, а–г. Как было отмечено, использование рассматриваемого смесевое биотоплива привело к незначительному росту часового расхода топлива  $G_T$  (см. рис. 1 и 2, а). Так, при переводе двигателя с ДТ на смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  величина  $G_T$  возросла от 20,10 с 20,24 кг/ч, а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  — с 13,10 до 13,28 кг/ч (см. рис. 2, а и табл. 4).

Таблица 3

## Характеристики дизельного двигателя типа Д-245.12С, работающего на различных видах топлива

Характеристики	Вид топлива		
	ДТ	Смесь 95 % ДТ и 5 % ЛМ	Смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ
Часовой расход топлива, кг/ч:			
режим максимальной мощности	20,10	20,18	20,24
режим максимального крутящего момента	13,10	13,13	13,28
Крутящий момент, Н·м:			
режим максимальной мощности	322	321	319
режим максимального крутящего момента	368	366	367
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч):			
режим максимальной мощности	248,4	250,8	252,1
режим максимального крутящего момента	226,2	228,9	230,1
Эффективный КПД:			
режим максимальной мощности	0,341	0,340	0,340
режим максимального крутящего момента	0,374	0,373	0,373
Дымность ОГ, % по шкале Хартриджа:			
режим максимальной мощности	16,0	12,0	11,0
режим максимального крутящего момента	43,0	37,5	36,0
Условные (средние) показатели топливной экономичности на режимах 13-режимного цикла, г/(кВт·ч):			
эффективный расход топлива	247,97	248,72	252,26
эффективный КПД	0,341	0,343	0,340
Интегральные удельные выбросы токсичных компонентов на режимах 13-режимного цикла, г/(кВт·ч):			
оксидов азота	7,018	6,230	6,441
монооксида углерода	1,723	1,631	1,511
несгоревших углеводородов	0,788	0,695	0,664

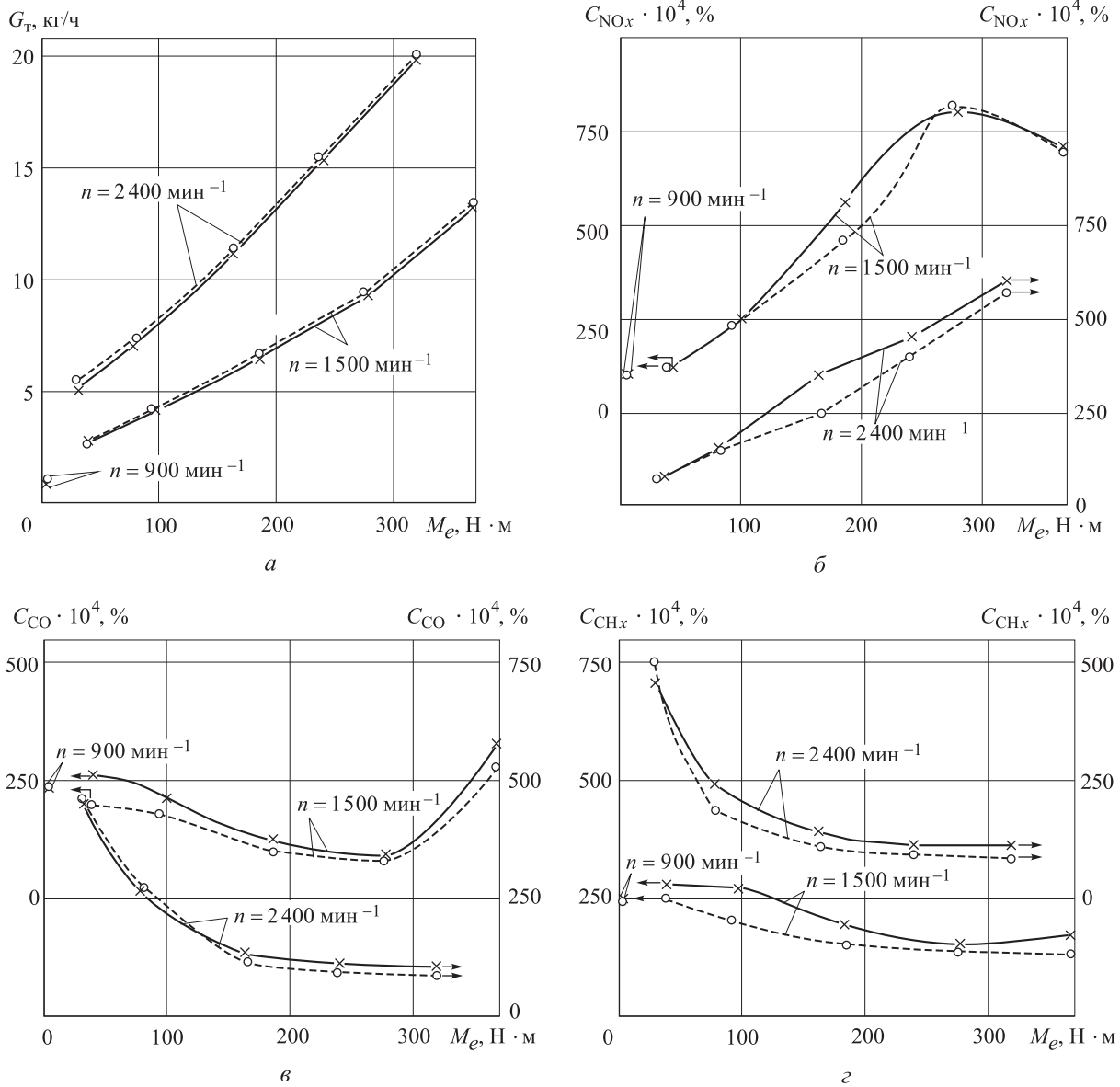


Рис. 2. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  (а), объемной концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{NO_x}$  (б), монооксида углерода  $C_{CO}$  (в), углеводородов  $C_{CH_x}$  (г) от частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$  дизельного двигателя типа Д-245.12С при использовании различных топлив: — — ДТ; - - - - смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ

Таблица 4

Оптимизация параметра  $C_{LM}$  дизельного двигателя типа Д-245.12С

Содержание ЛМ в смеси, %	Показатели дизеля				
	$\eta_{e\text{ усл } i}$	$\eta_{e\text{ пр}}$	$e_{NO_x}$ , г/(кВт·ч)	$e_{NO_x\text{ пр}}$	$\Phi_o$
0	0,341	1,0000	7,018	1,0000	1,0000
5	0,343	1,0058	6,230	0,8877	0,8825
9	0,340	0,9970	6,441	0,9177	0,9204

При использовании смесового биотоплива на большинстве исследуемых режимов имело место уменьшение содержания в ОГ оксидов азота  $C_{NO_x}$  (см. рис. 2, б). Так, перевод дизельного двигателя с ДТ на смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ на режиме холостого хода при  $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

сопровождался снижением концентрации  $C_{NO_x}$  с 0,0100 до 0,0095 %, на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  концентрация  $C_{NO_x}$  уменьшилась с 0,0700 до 0,0690 %, а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — с 0,0605 до 0,0570 %.

При использовании смесового биотоплива отмечена тенденция снижения содержания в ОГ монооксида углерода  $C_{CO}$  (см. рис. 2, в). Перевод двигателя с ДТ на смесь 91 % ДТ и 9 % на режиме холостого хода при  $n = 900 \text{ мин}^{-1}$  не сказался на концентрации  $C_{CO}$  — она осталась неизменной и равной 0,0240 %. Однако на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  концентрация  $C_{CO}$  снизилась с 0,0330 до 0,0280 %, а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — с 0,0102 до 0,0085 %.

Перевод исследуемого дизеля на смесовое биотопливо оказал наибольшее положительное влияние на содержание в ОГ несгоревших углеводородов  $C_{CHx}$  (см. рис. 2, г): при переходе на смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ на режиме холостого хода при  $n = 900 \text{ мин}^{-1}$  отмечено снижение концентрации  $C_{CHx}$  с 0,0240 до 0,0239 %; на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  — с 0,0170 до 0,0130 %; на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — с 0,0108 до 0,0083 %.

По приведенным на рис. 2 характеристикам содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов (оксидов азота  $C_{NOx}$ , монооксида углерода  $C_{CO}$ , несгоревших углеводородов  $C_{CHx}$ ) рассчитаны их часовые массовые выбросы ( $E_{NOx}$ ,  $E_{CO}$ ,  $E_{CHx}$ ). Полученные значения вредных выбросов просуммированы за весь цикл по каждому компоненту (с учетом коэффициентов  $K_i$ , отражающих долю времени каждого режима) и затем делением на условную среднюю мощность дизельного двигателя за испытательный цикл  $\sum(N_{ei} \cdot K_i)$  определены интегральные за испытательный цикл удельные выбросы вредных веществ по формулам [2, 15]:

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

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

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

Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-ступенчатого цикла проведена по среднему (условному) удельному эффектив-

ному расходу топлива, который определялся с использованием данных рис. 2, а и зависимости [2, 15]

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

где  $G_{Ti}$  и  $N_{ei}$  — часовой расход топлива и эффективная мощность двигателя на  $i$ -м режиме. Поскольку смесовые биотоплива имеют меньшую теплотворную способность, топливная экономичность двигателя при его работе на этих топливах оценивалась не удельным эффективным расходом топлива  $g_e$ , а эффективным КПД  $\eta_e$ . Причем для интегральной оценки работы дизельного двигателя на режимах 13-ступенчатого цикла использован условный эффективный КПД, определяемый из соотношения [2, 15]

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

где  $H_U$  — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг. Результаты расчетов указанных параметров представлены в табл. 3.

Приведенные в табл. 3 данные подтверждают возможность улучшения экологических показателей двигателя Д-245.12С при его переводе с ДТ на смесь 91 % ДТ и 9 % ЛМ. Так, при подаче в камеру сгорания дизеля исследуемого смесового биотоплива на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента дымность ОГ снизилась на 16...31 % по сравнению с использованием нефтяного ДТ. Удельный массовый выброс несгоревших углеводородов  $e_{CHx}$  на режимах 13-ступенчатого цикла уменьшился с 0,788 до 0,664 г/(кВт·ч), т. е. на 15,7 %; удельный массовый выброс монооксида углерода  $e_{CO}$  снизился с 1,723 до 1,511 г/(кВт·ч), т. е. на 12,3 %. При этом удельный массовый выброс оксидов азота  $e_{NOx}$  снизился с 7,018 до 6,441 г/(кВт·ч), т. е. на 8,2 %, а условный эффективный КПД  $\eta_{e \text{ усл}}$  остался практически неизменным (уменьшился с 0,341 до 0,340, что находится в пределах точности определения этого показателя).

Представленные результаты исследований дизельного двигателя типа Д-245.12С получены при его работе на смесовом биотоптиве, содержащем 91 % ДТ и 9 % ЛМ. Но определенный интерес представляет вопрос о влиянии состава смесового биотоплива на характеристики двигателя. В связи с этим проведен анализ показателей двигателя типа Д-245.12С, работающего

на нефтяном ДТ, смеси 95 % ДТ и 5 % ЛМ, смеси 91 % ДТ и 9 % ЛМ. При этом использованы данные табл. 3. Характеристики удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД двигателя  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_X$  в зависимости от концентрации ЛМ в смесевом биотопливе  $S_{ЛМ}$  приведены в табл. 3 и на рис. 3. На режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  увеличение концентрации льняного масла в смесевом биотопливе  $S_{ЛМ}$  с 0 до 5 и 9 % приводит к росту удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  с 248,4 до 250,8 и 252,1 г/(кВт·ч) и снижению дымности ОГ  $K_X$  — с 16,0 до 12,0 и 11,0 %. Аналогичное увеличение  $S_{ЛМ}$  на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  сопровождалось ростом  $g_e$  с 226,2 до 228,9 и 230,1 г/(кВт·ч) и уменьшением  $K_X$  — с 43,0 до 37,5 и 36,0 %. Таким образом, использование рассматриваемых смесевых биотоплив позволило заметно уменьшить дымность ОГ. Указанное же увеличение удельного расхода смесевых биотоплив объясняется их меньшей теплотворной способностью  $H_U$ , см. табл. 2). При этом с увеличением содержания ЛМ в смесевом биотопливе эффективность процесса сгорания изменялась сравнительно слабо. Так, на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  при концентрации льняного масла в смесевом биотопливе  $S_{ЛМ}$ , равной 0, 5 и 9 %, условный эффективный КПД дизеля  $\eta_{e \text{ усл}}$  составил 0,341, 0,340 и 0,340 соответственно, а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  — 0,374, 0,373 и 0,373 (см. табл. 3).

Значения интегральных на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла удельных массовых выбросов токсичных компонентов, представленные в табл. 3 и на рис. 4, подтвердили возможность заметного улучшения экологических показателей исследуемого двигателя при использовании смесевых биотоплив. При концентрации льняного масла в смесевом биотопливе  $S_{ЛМ}$ , равной 0, 5 и 9 %, выбросы оксидов азота  $e_{NO_x}$  составили соответственно 7,018, 6,230 и 6,441 г/(кВт·ч); выбросы монооксида углерода  $e_{CO}$  — 1,723, 1,631 и 1,511 г/(кВт·ч); выбросы несгоревших углеводородов  $e_{CH_x}$  — 0,788, 0,695 и 0,664 г/(кВт·ч).

Полученные данные не позволяют дать однозначные рекомендации по составу исследуемого смесевых биотоплива (объемному содержанию в смеси с нефтяным ДТ льняного масла  $S_{ЛМ}$ ), поскольку рассматриваемые показатели топливной экономичности и токсичности ОГ находятся в сложной противоречивой

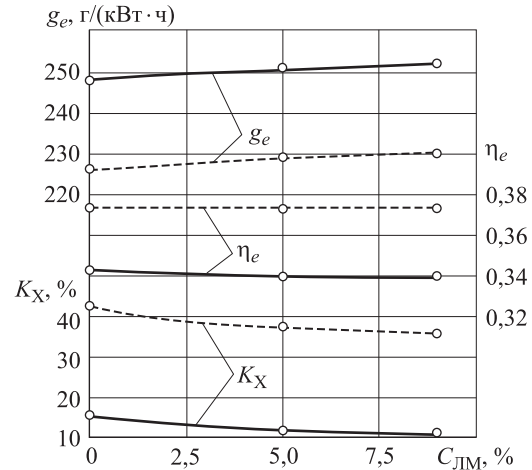


Рис. 3. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  и эффективного КПД  $\eta_e$  дизельного двигателя типа Д-245.12С, дымности его ОГ  $K_X$  от содержания льняного масла  $S_{ЛМ}$  в смесевом биотопливе на режимах ВСХ: — на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; - - - на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

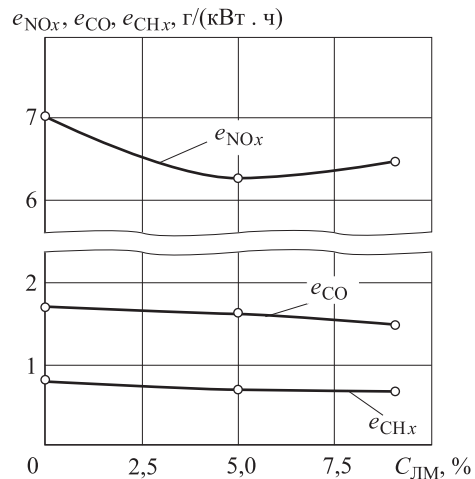


Рис. 4. Зависимость удельных массовых выбросов оксидов азота  $e_{NO_x}$ , монооксида углерода  $e_{CO}$  и углеводородов  $e_{CH_x}$  дизельного двигателя типа Д-245.12С от содержания льняного масла  $S_{ЛМ}$  в смесевом биотопливе на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла

зависимости от содержания ЛМ в смесевом биотопливе. Поэтому для определения целесообразного состава смесевых биотоплив необходимо использование методов оптимизации.

Для решения задачи оптимизации состава смесевых биотоплив использован метод свертки, при котором частные критерии оптимальности сводятся к обобщенному мультипликативному критерию [15]. В качестве частных критериев оптимальности выбраны условный эффективный КПД двигателя  $\eta_{e \text{ усл}}$  и



показатели токсичности ОГ. Основными токсичными компонентами ОГ дизелей являются оксиды азота  $\text{NO}_x$  [15, 16]. Их доля в суммарных токсичных выбросах дизельных двигателей составляет более 30...80% по массе и более 60...95% по эквивалентной токсичности. В предлагаемой методике оптимизации удельные массовые выбросы  $\text{NO}_x$  приняты в качестве частного критерия оптимальности, характеризующего токсичность ОГ. Поскольку условный эффективный КПД  $\eta_{\text{еусл}}$  и удельные массовые выбросы оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  имеют различную размерность, то при оптимизации состава смесового биотоплива использованы приведенные (относительные безразмерные) значения этих параметров, определяемые в виде

$$\eta_{\text{епр}} = \eta_{\text{еусл } i} / \eta_{\text{еусл } 0}; \quad (1)$$

$$e_{\text{NO}_x \text{ пр}} = e_{\text{NO}_x i} / e_{\text{NO}_x 0}, \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{еусл } i}$ ,  $e_{\text{NO}_x i}$  — условный эффективный КПД двигателя и удельные массовые выбросы оксидов азота при рассматриваемом составе смесового биотоплива (при  $i$ -м содержании ЛМ в смеси с нефтяным ДТ);  $\eta_{\text{еусл } 0}$ ,  $e_{\text{NO}_x 0}$  — соответствующие параметры дизеля при его работе на чистом ДТ (при нулевом содержании ЛМ в смеси). В предлагаемой методике оптимизации значимость частных критериев оптимальности принята одинаковой. Эта методика базируется на составлении мультипликативного обобщенного критерия оптимальности в виде произведения двух частных критериев, один из которых характеризует условный эффективный КПД дизеля, а второй — удельные массовые выбросы оксидов азота. Таким образом, задача оптимизации состава смесового биотоплива сводится к нахождению обобщенного мультипликативного критерия оптимальности (обобщенной целевой функции) в виде

$$\Phi_0 = (1/\eta_{\text{епр}}) e_{\text{NO}_x \text{ пр}}. \quad (3)$$

Оптимизация состава смесового биотоплива с использованием выражений (1)–(3) проведена путем изменения величины  $C_{\text{ЛМ}}$  от 0 до 9% и вычисления в каждой узловой точке (при  $C_{\text{ЛМ}} = 0; 5; 9\%$ ) значений обобщенной целевой функции  $\Phi_0$ . Ее минимальное значение соответствует оптимальному составу смесового биотоплива. С использованием описанной методики и расчетных данных, представленных на рис. 2 и в табл. 3, проведена оптимизация параметра  $C_{\text{ЛМ}}$ , результаты которой приведены в табл. 4.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для дизельного двигателя типа Д-245.12С оптимальным в соответствии с выражением (3) является состав смесового биотоплива 95% ДТ и 5% ЛМ. При таком составе топлива достигается минимум обобщенной целевой функции  $\Phi_0 = 0,8825$  (см. табл. 4). При составе топлива 91% ДТ и 9% ЛМ значение обобщенной целевой функции  $\Phi_0 = 0,9204$  существенно ниже, чем при работе исследуемого двигателя на чистом нефтяном топливе ( $\Phi_0 = 1,000$ ). Это свидетельствует о том, что использование льняного масла как экологической добавки к нефтяному ДТ является эффективным средством улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ. Содержащийся в молекулах льняного масла кислород благоприятно сказывается на выбросах с ОГ дизеля нормируемых токсичных компонентов — оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода  $\text{CO}$ , несгоревших углеводородов  $\text{CH}_x$ , а также на дымности ОГ  $K_x$ . Полученные данные подтвердили возможность оптимизации состава рассматриваемого смесового биотоплива, но требуется проведение дальнейших исследований при большем диапазоне содержания ЛМ в смесовом биотопливе.

## Литература

- [1] Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Иващенко Н.А. *Работа дизелей на нетрадиционных топливах*. Москва, Изд-во Легион-Автодата, 2008. 464 с.
- [2] 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 О니ко-М, 2011. 536 с.
- [3] Скляр С.В., Горлов С.Л. Хозяйственная ценность образца льна масличного К-2001 в связи с селекцией на низкоолеиновость. *Масла и жиры*. 2012, № 8, с. 20–21.
- [4] Гусева Д.А., Широин А.В., Санжаков М.А., Прозоровская Н.Н., Сравнительный анализ льняного масла трех вариантов холодного отжима. *Масложировая промышленность*, 2011, № 6, с. 30–32.
- [5] Петрова С.Н., Маланина О.О. Влияние условий хранения на качественные показатели подсолнечного и льняного масла. *Масложировая промышленность*, 2012, № 1, с. 16–18.

- [6] Ладыгин В.В., Прохорова Л.Т., Журавлева Л.Н., Лисицына И.А., Довгалиук И.В., Аюкова Т.П., Горшкова Э.И., Меркулова М.И. Химический состав и окислительная стабильность пищевого льняного масла. *Масложировая промышленность*, 2011, № 5, с. 12–15.
- [7] Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Акимов В.С. Биодизельные топлива из различных сырьевых ресурсов. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2011, № 3, с. 25–31.
- [8] Goering C.E., Daugherty M.J. Energy Accounting for Eleven Vegetable Oil Fuels. *Transactions of the ASAE*, 1982, vol. 25, no. 5, pp. 1209–1215.
- [9] Goering C.E., Schwab A.W., Daugherty M.J., Pryde E.H., Heakin A.J. Fuel Properties of Eleven Vegetable Oils. *Transactions of the ASAE*, 1982, vol. 25, no. 6, pp. 1472–1477.
- [10] Knorr W., Daute P., Grutmacher R., Hofer R. Development of New Fields of Application for Linseed Oil. *Fett Wissenschaft Technologi*, 1995, Jg. 97, no. 5, pp. 165–169.
- [11] Agarwal A.K., Das L.M. Biodiesel Development and Characterization for Use as a Fuel in Compression Ignition Engines. *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, vol. 123, № 2, pp. 440–447.
- [12] Agarwal A.K., Bijwe J., Das L.M. Effect of Biodiesel Utilization of Wear of Vital Parts in Compression Ignition Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, vol. 125, № 2, pp. 604–611.
- [13] Agarwal A.K., Bijwe J., Das L.M. Wear Assessment in a Biodiesel Fueled Compression Ignition Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, vol. 125, № 3, pp. 820–826.
- [14] Sebedio J.L., Prevost J., Grandgirard A. Heat Treatment of Vegetable Oils. I. Isolation of the Cyclic Fatty Acid Monomers from Heated Sunflower and Linseed Oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1987, vol. 64, № 7, pp. 1026–1032.
- [15] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
- [16] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Системы топливоподачи и управления дизелей*. Москва, Изд-во Легион-Автодата, 2005. 344 с.

## References

- [1] Markov V.A., Gaivoronskii A.I., Grekhov L.V., Ivashchenko N.A. *Rabota dizelei na netraditsionnykh toplivakh* [Work on non-conventional diesel fuels]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2008. 464 p.
- [2] 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, OOO NITs Inzhener publ., OOO Oniko-M publ., 2011. 536 p.
- [3] Skliarov S.V., Gorlov S.L. Khoziaistvennaia tsennost' obraztsa l'na maslichnogo K-2001 v svyazi s selektsiei na nizkooleinovost' [The economic value of the sample linseed K-2001 in connection with the selection for the low-oleic]. *Masla i zhiry* [Oils and fats]. 2012, no. 8, pp. 20–21.
- [4] Guseva D.A., Shironin A.V., Sanzhakov M.A. Prozorovskaia N.N., Sravnitel'nyi analiz l'nianogo masla trekh variantov kholodnogo otzhima [Comparative analysis of flaxseed oils produced by three variants of cold-pressing]. *Maslozhirovaia promyshlennost'* [Fat and oil processing industry]. 2011, no. 6, pp. 30–32.
- [5] Petrova S.N., Malanina O.O. Vliianie uslovii khraneniia na kachestvennye pokazateli podsolnechnogo i l'nianogo masla [Impact of storage conditions on sun and linseed oils quantity]. *Maslozhirovaia promyshlennost'* [Fat and oil processing industry]. 2012, no. 1, pp. 16–18.
- [6] Ladygin V.V., Prokhorova L.T., Zhuravleva L.N., Lisitsyna I.A., Dovgaliuk I.V., Aiukova T.P., Gorshkova E.I., Merkulova M.I. Khimicheskii sostav i okislitel'naia stabil'nost' pishchevogo l'nianogo masla [The chemical compound and oxidizing stability of edible linen oil]. *Maslozhirovaia promyshlennost'* [Fat and oil processing industry]. 2011, no. 5, pp. 12–15.
- [7] Markov V.A., Devianin S.N., Nagornov S.A., Akimov V.S. Biodizel'nye topliva iz razlichnykh syr'evykh resursov [Fuels produced from various raw material sources]. *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport]. 2011, no. 3, pp. 25–31.

- [8] Goering C.E., Daugherty M.J. Energy Accounting for Eleven Vegetable Oil Fuels. *Transactions of the ASAE*, 1982, vol. 25, no. 5, pp. 1209–1215.
- [9] Goering C.E., Schwab A.W., Daugherty M.J., Pryde E.H., Heakin A.J. Fuel Properties of Eleven Vegetable Oils. *Transactions of the ASAE*, 1982, vol. 25, no. 6, pp. 1472–1477.
- [10] Knorr W., Daute P., Grutzmacher R., Hofer R. Development of New Fields of Application for Linseed Oil. *Fett Wissenschaft Technologi*, 1995, Jg. 97, no. 5, pp. 165–169.
- [11] Agarwal A.K., Das L.M. Biodiesel Development and Characterization for Use as a Fuel in Compression Ignition Engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, vol. 123, iss. 2, pp. 440–447.
- [12] Agarwal A.K., Bijwe J., Das L.M. Effect of Biodiesel Utilization of Wear of Vital Parts in Compression Ignition Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, vol. 125, iss. 2, pp. 604–611.
- [13] Agarwal A.K., Bijwe J., Das L.M. Wear Assessment in a Biodiesel Fueled Compression Ignition Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, vol. 125, iss. 3, pp. 820–826.
- [14] Sebedio J.L., Prevost J., Grandgirard A. Heat Treatment of Vegetable Oils. I. Isolation of the Cyclic Fatty Acid Monomers From Heated Sunflower and Linseed Oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1987, vol. 64, iss. 7, pp. 1026–1032.
- [15] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelei* [Exhaust emissions of diesel engines]. Moscow, Bauman Press, 2002. 376 p.
- [16] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Sistemy toplivopodachi i upravleniia dizelei* [Fuel system and control of diesel engines]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2005. 344 p.

Статья поступила в редакцию 22.04.2015

## 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: markov@power.bmstu.ru).

**ДЕВЯНИН Сергей Николаевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Тракторы и автомобили». Московский государственный агроинженерный университет (МГАУ) им. В.П. Горячкина (127550, Москва, Российская Федерация, Тимирязевская ул., 58, e-mail: devta@rambler.ru).

**ТРИФОНОВ Валерий Львович** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

## 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, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

**DEVYANIN Sergey Nikolaevich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Head of Department of Tractors and Automobiles. Goryachkin Moscow State Agro-Engineering University (MGAU) (127550, Moscow, Russian Federation, Timiryazevskaya St., 58, e-mail devta@rambler.ru).

**TRIFONOV Valery Lvovich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Thermal Physics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).