

# Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.436

## Оптимизация состава многокомпонентных смесевых биотоплив для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин

**В.А. Марков, С.Н. Девянин, Л.И. Быковская**

*Биотоплива, получаемые из растительных масел, находят все большее применение в дизельных двигателях. В статье проведен анализ физико-химических свойств нефтяного дизельного топлива и биотоплив различного состава. Разработана методика оптимизации состава многокомпонентных смесевых биотоплив для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин. Определен оптимальный состав смеси дизельного топлива, рапсового масла и бензина АИ-80, обеспечивающий наилучшее сочетание показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов. Использование в дизеле типа Д-245.12С оптимального смесевого топлива, содержащего 85% по объему нефтяного дизельного топлива, 5% рапсового масла и 10% бензина АИ-80, позволило снизить выброс наиболее значимого токсичного компонента отработавших газов – оксидов азота на 7,6%.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, дизельное топливо, рапсовое масло, бензин, многокомпонентное смесевое биотопливо.

## Optimization of the composition of multi-component mixed biofuels for diesel engines of agricultural machines

**V.A. Markov, S.N. Devyanin, L.I. Bykovskaya**

*Biofuels derived from vegetable oils are increasingly used in diesel engines. This paper analyzes physical and chemical properties of petroleum diesel fuels and biofuels of different composition. A technique for optimizing multi-component mixed biofuels for diesel engines of agricultural machines is developed. The optimum composition of the mixture of a diesel fuel, gasoline AI-80 and rapeseed oil, which provides the best combination of fuel efficiency and low toxic emissions in the exhaust, is determined. The use of the optimal fuel mixture containing 85% by volume of pe-*



**МАРКОВ**  
Владимир Анатольевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
**MARKOV**  
Vladimir Anatol'evich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**ДЕВЯНИН**  
Сергей Николаевич  
**DEVYANIN**  
Sergey Nikolaevich



**БЫКОВСКАЯ**  
Лариса Игоревна  
**BYKOVSKAYA**  
Larisa Igorevna  
(Московский  
государственный  
агроинженерный университет  
им. В.П. Горячкина)  
(Moscow, Russian Federation,  
Moscow State Agroengineering  
University n.a. V.P. Goryachkin)

*troleum diesel fuel, 5% of rapeseed oil, and 10% of gasoline AI-80 in a D-245.12S-type diesel made it possible to reduce emissions of the most toxic components of exhaust gases, that is, nitrogen oxides by 7.6%.*

**Keywords:** diesel engine, diesel fuel, rapeseed oil, gasoline, multi-component mixed biofuel.

В последние годы в связи с обостряющимся энергетическим кризисом и нарастающим дефицитом нефтяных энергоносителей повышенный интерес проявляется к топливам, получаемым из возобновляемых энергетических ресурсов растительного происхождения, сырьевые запасы которых практически неограничены. Применительно к дизельным двигателям транспортного и сельскохозяйственного назначения перспективными считаются биотоплива, производимые из растительных масел [1–3].

Для условий европейской части России наиболее перспективными представляются топлива на основе рапсового масла (РМ). Следует отметить, что РМ и топливо, получаемые на его основе, имеют физико-химические свойства, отличающиеся от свойств нефтяного дизельного топлива (ДТ) [1, 4, 5]. Поэтому при переводе двигателей, изначально адаптированных к работе на ДТ, на биотоплива возникает ряд проблем, связанных с организацией рабочих процессов, в первую очередь — процессов топливоподачи, распыливания топлива, смесеобразования и сгорания. Таким образом, необходима адаптация двигателей к работе на этом виде топлива. Эффективный путь адаптации двигателей к работе на биотопливах — применение смесевых биотоплив (в частности, смесей ДТ и РМ).

Одной из проблем, возникающих при работе дизельного двигателя на РМ, является его повышенная вязкость (рис. 1, а). Наибольшее приближение физических свойств биотоплив к свойствам нефтяного ДТ достигается при использовании смесевых многокомпонентных биотоплив [1, 6]. При этом желательна добавка в смесевое топливо легких компонентов — бензина, диметилового эфира и др. [7]. Для анализа свойств смесевых биотоплив в работе использованы данные статьи [8], в которой исследованы многокомпонентные смеси биотоплива следующих составов: смесь 85% ДТ, 5% РМ и 10%

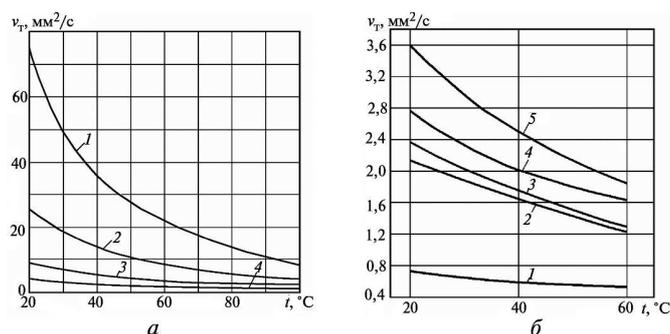


Рис. 1. Вязкостно-температурные характеристики топлив:

а — двухкомпонентных (1 — РМ; 2 — смесь 50% ДТ и 50% РМ; 3 — смесь 80% ДТ и 20% РМ; 4 — ДТ);  
б — многокомпонентных (1 — АИ-80; 2 — смесь 85% ДТ, 5% РМ и 10% АИ-80; 3 — ДТ; 4 — смесь 80% ДТ, 10% РМ и 10% АИ-80; 5 — смесь 70% ДТ, 20% РМ и 10% АИ-80)

бензина АИ-80; смесь 80% ДТ, 10% РМ и 10% бензина АИ-80; смесь 70% ДТ, 20% РМ и 10% бензина АИ-80. Некоторые свойства этих смесей представлены в табл. 1 и на рис. 1, б. Исследуемый бензин АИ-80 при 20 °С имел плотность  $\rho = 756 \text{ кг/м}^3$  и вязкость  $\nu = 0,73 \text{ мм}^2/\text{с}$ , что существенно меньше плотности и вязкости исследуемых ДТ и РМ (см. табл. 1), благодаря чему разбавление смесей ДТ и РМ бензином АИ-80 позволяет заметно снизить повышенные плотность и вязкость исходных смесей.

Вязкостно-температурные характеристики, представленные на рис. 1, а, свидетельствуют о том, что при нормальной температуре ( $t = 20 \text{ °С}$ ) вязкость РМ на порядок выше, чем у нефтяного ДТ [1]. В частности, в представленных ниже исследованиях использовалось ДТ «З» по ГОСТ 305—82 и РМ отечественного производства, имеющие кинематическую вязкость соответственно  $\nu_t = 2,37$  и  $75 \text{ мм}^2/\text{с}$  (см. табл. 1).

Существенно меньшей вязкостью обладают смеси РМ и ДТ. Так, по данным рис. 1, а, вязкость смеси, содержащей 80% ДТ (по объему) и 20% РМ при  $t = 20 \text{ °С}$  составляет  $\nu_t = 9 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Но и такая вязкость смесевых биотоплив заметно превышает вязкость ДТ (в соответствии с ГОСТ 305—82 вязкость летнего дизельного топлива  $\nu_t = 3...6 \text{ мм}^2/\text{с}$ ). Многокомпонентные биотоплива в работе [8] при 20 °С имели

Таблица 1

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Физико-химические свойства	Топливо						
	ДТ	РМ	АИ-80	80% ДТ и 20% РМ*	85% ДТ, 5% РМ и 10% АИ-80	80% ДТ, 10% РМ и 10% АИ-80	70% ДТ, 20% РМ и 10% АИ-80
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	805	913	756	848	807	815	823
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	2,37	75,0	0,73	9,0	2,127	2,771	3,599
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, м·Н/м	27,1	33,2	22,0	—	—	—	—
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42 500	37 300	44 000	41 500	42 400	42 000	41 500
Цетановое число	45	36	20	—	—	—	—
Температура самовоспламенения, °С	250	318	400	—	—	—	—
Температура помутнения, °С	-25	-9	—	—	—	—	—
Температура застывания, °С	-35	-20	-55	—	—	—	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,5	14,8	14,0	14,3	14,2	14,0
Содержание, % по массе:							
С	87,0	77,0	85,5	85,0	86,4	85,9	84,9
Н	12,6	12,0	14,5	12,5	12,8	12,7	12,6
О	0,4	11,0	0,0	2,5	0,8	1,4	2,5
Общее содержание серы, % по массе	0,20	0,002	0,05	0,16	0,175	0,165	0,145
Коксуемость 10%-ного остатка, % по массе	0,2	0,4	—	—	—	—	—

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

\* По данным работы [1].

плотность 807...823 кг/м<sup>3</sup> и вязкость 2,127...3,599 мм<sup>2</sup>/с, что соответствует допустимому диапазону изменения плотности и вязкости нефтяного ДТ (см. табл. 1).

В работе [8] определены основные показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), работающего на нефтяном ДТ и многокомпонентных биотопливах. Результаты этих исследований представлены на рис. 2 и 3 и в табл. 2.

Интегральные на режимах 13-режимного испытательного цикла ECE R49 удельные массовые выбросы оксидов азота  $e_{NOx}$ , монооксида углерода  $e_{CO}$  и легких несгоревших углеводородов

$e_{CHx}$  определены по общепринятой методике с использованием экспериментальных данных (рис. 3, б-г) и выражений [9]

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

$$e_{CHx} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{CHxi} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad (1)$$

где  $E_{NOxi}$ ,  $E_{COi}$  и  $E_{CHxi}$  — массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода и легких не-

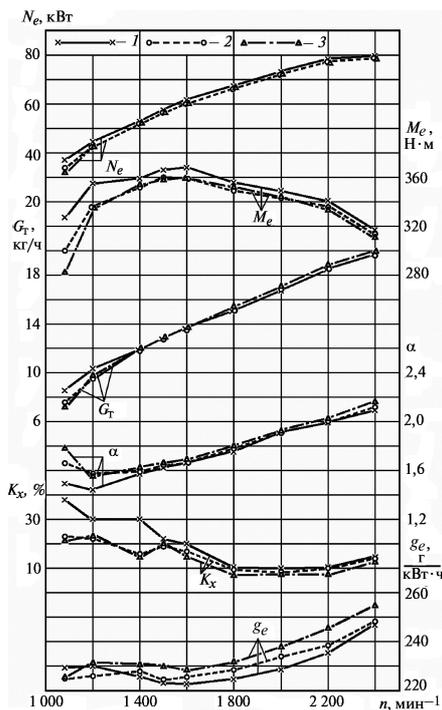


Рис. 2. Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , расхода топлива  $G_t$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики:

1 — ДТ; 2 — биотопливо № 1 (85% ДТ, 5% РМ и 10% АИ-80); 3 — биотопливо № 2 (70% ДТ, 20% РМ и 10% АИ-80)

сгоревших углеводородов на  $i$ -м режиме, г/ч;  $N_{e_i}$  — эффективная мощность двигателя на  $i$ -м режиме, кВт;  $K_i$  — весовой коэффициент, отражающий значимость этого режима — долю времени работы двигателя на  $i$ -м режиме.

Эксплуатационный расход топлива оценивался по среднему на режимах этого цикла (условному) удельному эффективному расходу топлива, который определялся с использованием данных рис. 3, а и зависимости [9]:

$$g_{e\text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{t_i} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{e_i} K_i}, \quad (2)$$

где  $G_{t_i}$  — часовой расход топлива на  $i$ -м режиме. Поскольку смесевые биотоплива имеют меньшую теплотворную способность, топлив-

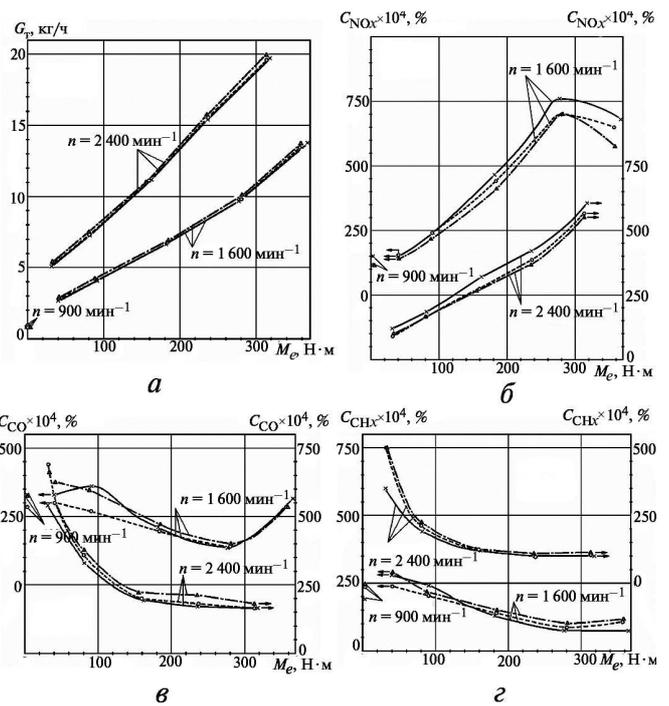


Рис. 3. Зависимость часового расхода топлива  $G_t$  (а), объемной концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$  (б), монооксида углерода  $C_{CO}$  (в), углеводородов  $C_{CHx}$  (г) от частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$  дизеля Д-245.12С на режимах 13-режимного испытательного цикла ECE R49 при использовании различных топлив:

×—× — ДТ; о- - - о — биотопливо № 1 (85% ДТ, 5% РМ и 10% АИ-80); △— — △ — биотопливо № 2 (70% ДТ, 20% РМ и 10% АИ-80)

ная экономичность дизеля при его работе на этих топливах оценивалась не удельным эффективным расходом топлива  $g_e$ , а эффективным КПД двигателя  $\eta_e$ . Причем, для интегральной оценки работы дизеля на режимах 13-режимного цикла использовался условный эффективный КПД, определяемый из соотношения

$$\eta_{e\text{ усл}} = \frac{3600}{H_U g_{e\text{ усл}}}, \quad (3)$$

где  $H_U$  — низшая теплота сгорания топлива (для ДТ принята равной  $H_U = 42,5$  МДж/кг). Результаты расчетов интегральных показателей топливной экономичности и токсичности ОГ представлены в табл. 2. Эти данные подтверждают возможность заметного улучшения экологических показателей дизеля Д-245.12С при его переводе с ДТ на многокомпонентные биотоплива. Так, при переводе дизеля с ДТ на био-

Таблица 2

Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ и многокомпонентных биотопливах на режимах внешней скоростной характеристики и 13-режимного испытательного цикла ECE R49

Показатели дизеля	Топливо		
	ДТ	Биотопливо № 1 (85% ДТ, 5% РМ и 10% АИ-80)	Биотопливо № 2 (70% ДТ, 20% РМ и 10% АИ-80)
Часовой расход топлива $G_T$ , кг/ч:			
режим максимальной мощности	19,70	19,65	19,94
режим максимального крутящего момента	13,72	13,53	13,74
Крутящий момент дизеля $M_e$ , Н·м:			
режим максимальной мощности	317	314	311
режим максимального крутящего момента	368	359	359
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч):			
режим максимальной мощности	246,8	249,2	254,6
режим максимального крутящего момента	222,6	225,5	228,4
Эффективный КПД дизеля $\eta_e$ :			
режим максимальной мощности	0,343	0,341	0,341
режим максимального крутящего момента	0,381	0,377	0,380
Дымность ОГ $K_x$ , % по шкале Хартриджа:			
режим максимальной мощности	14,5	14,0	12,5
режим максимального крутящего момента	20,0	17,0	14,5
Условные (средние) показатели топливной экономичности дизеля на режимах 13-режимного цикла:			
эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)	243,24	245,53	249,95
эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	0,348	0,346	0,347
Интегральные удельные выбросы токсичных компонентов на режимах 13-режимного цикла, г/(кВт·ч):			
оксиды азота $e_{\text{NO}_x}$	6,630	6,451	6,154
монооксид углерода $e_{\text{CO}}$	2,210	2,123	2,313
несгоревшие углеводороды $e_{\text{СН}_x}$	0,580	0,663	0,722

топлива № 1 и 2 на режимах 13-режимного цикла удельный массовый выброс оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  снизился с 6,630 до 6,451 и 6,154 г/(кВт·ч), т. е. на 2,7 и 7,2 %, соответственно. При этом изменения выброса монооксида углерода  $e_{\text{CO}}$ , не превысили 3...4% (как в сторону уменьшения при работе на биотопливе № 1, так и в сторону увеличения при работе на биотопливе № 2). Максимальное значение дымности ОГ (на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ) снизилась на 27,5%. При использовании многокомпонентных биотоплив отмечен рост выброса несгоревших углеводородов. Эффективный КПД оказался слабо зависимым от вида применяемого топлива.

Как отмечено выше, наибольшего приближения свойств биотоплив к свойствам нефтя-

ного ДТ можно достичь путем использования многокомпонентных биотоплив. При оптимизации состава этих топлив удастся обеспечить наилучшие показатели топливной экономичности и токсичности ОГ дизелей. Однако при этом необходимо учитывать реальное распределение режимов их работы при эксплуатации. В процессе эксплуатации дизельные двигатели могут работать на различных режимах, каждый из которых характеризуется частотой вращения коленчатого вала и нагрузкой на двигатель. Причем, при выполнении сельхозмашинами основных технологических операций распределение режимов работы их двигателей существенно отличается от режимов работы дизелей транспортных средств, эксплуатируемых в условиях интенсивного городского движения [10–12].

Распределение режимов работы транспортных дизелей зависит от условий эксплуатации транспортного средства, его особенностей (конструкция и число передач трансмиссии, масса перевозимого груза и др.), характеристики дороги, квалификации водителя и стиля вождения [10, 13]. Типичным является приведенное на рис. 4 поле распределения режимов дизеля типа КамАЗ-740 (8 ЧН 12/12), полученное в условиях интенсивного городского движения грузового автомобиля КамАЗ-5320 [14]. Двигатель установлен на полностью загруженный автомобиль общей массой 16 т. В каждой подобласти этого поля указано относительное время работы дизеля в процентах. Основную долю времени (62%) двигатель работает в диапазоне частот вращения  $n = (0,48...0,67)n_{ном}$ , а в области номинальной частоты вращения — не более 2,5% (продолжительность работы дизеля на режиме номинальной мощности не превышает 0,4%). Время работы дизеля на режимах с полной нагрузкой (режимы внешней скоростной характеристики) составляют около 30% общего времени эксплуатации.

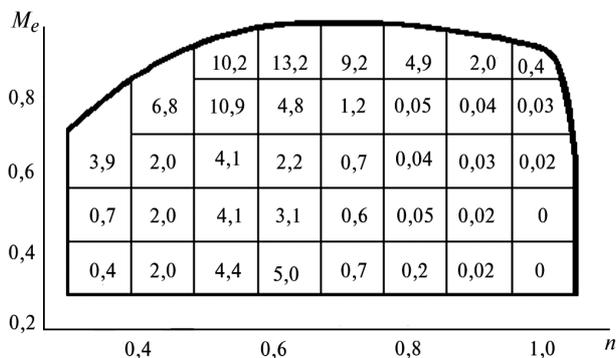


Рис. 4. Распределение режимов работы дизеля типа КамАЗ-740 грузового автомобиля в условиях городского движения:

$n$  — частота вращения коленчатого вала двигателя;  
 $M_e$  — крутящий момент двигателя

Некоторые особенности имеет распределение режимов работы автотракторных дизелей сельскохозяйственных машин. Распределение режимов дизеля, установленного на трактор или зерноуборочный комбайн, зависит от характеристики поля и урожайности сельскохозяйственных культур, технологических приемов пахоты или уборки, конструктивных особенностей сельхозмашины и стиля ее вождения

[10, 15–17]. Однако определяющее влияние на распределение режимов оказывает характер выполняемых работ. Для сельскохозяйственных машин наиболее характерны транспортные операции и основные технологические режимы. При выполнении транспортных работ (движение сельскохозяйственных машин к месту работы) дизель эксплуатируется в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала, а доля режимов с полной подачей топлива (режимы внешней скоростной характеристики) составляет лишь 2...3%. Ряд технологических операций также происходит при работе двигателя в достаточно широком диапазоне скоростных режимов. Например, выгрузка зерна в процессе движения комбайна «Дон-1500», оснащенного дизелем типа СМД-31 (6 ЧН 12/14), производится на режимах с частотами вращения коленчатого вала  $n = 1\ 300...2\ 100\ \text{мин}^{-1}$  при средней частоте вращения  $n = 1\ 600...1\ 700\ \text{мин}^{-1}$  (рис. 5, а) [10]. При этом средняя эксплуатационная мощность дизеля составляет 80...90% его полной мощности.

При выполнении основных технологических операций (прямое комбайнирование, пахота и др.) дизель типа СМД-31 комбайна «Дон-1500» работает в основном на режимах с большой частотой вращения (вблизи предельной регуляторной характеристики) со средней загрузкой 70...80% максимальной (рис. 5, б) [10]. При этом доля режимов предельной регуляторной характеристики и близких к ним режимов

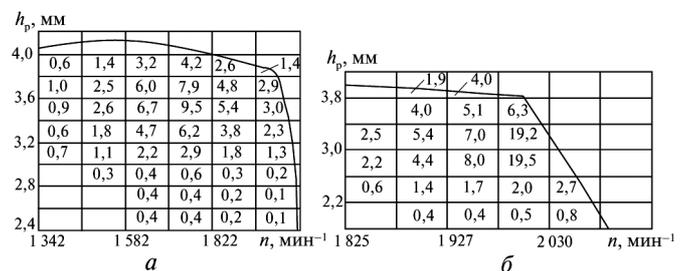


Рис. 5. Распределения режимов работы дизеля типа СМД-31 комбайна «Дон-1500» при выгрузке зерна (а) и уборке кукурузы (б):

$n$  — частота вращения коленчатого вала двигателя;  
 $h_p$  — положение дозирующего органа системы топливоподдачи, характеризующее подачу топлива и нагрузочный режим работы двигателя

с максимальной частотой вращения вала двигателя в этом технологическом процессе составляет около 50%. Представленные распределения режимов работы тракторного дизеля существенно отличаются от режимов 8-режимного испытательного цикла стандарта *ISO 8178-4*, регламентирующего токсичность ОГ дизелей внедорожных транспортных средств (рис. 6, а) [13]. Этот испытательный цикл наряду с режимом холостого хода при  $n = 0,3 n_{\text{ном}}$  (15% времени работы) включает семь нагрузочных режимов при номинальной частоте вращения коленчатого вала и частоте вращения  $n = 0,6 n_{\text{ном}}$ , соответствующей максимальному крутящему моменту. Причем, доля номинального режима составляет 15% общего времени работы двигателя.

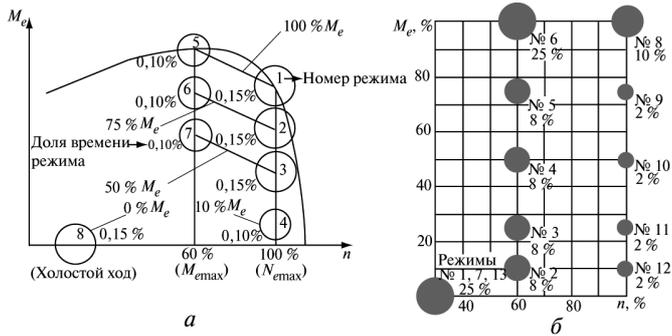


Рис. 6. 8-режимный испытательный цикл стандарта *ISO 8178-4* для дизельных двигателей внедорожных транспортных средств (а) и 13-режимный испытательный цикл *ECE R49* для оценки токсичности ОГ автомобильных дизелей в стендовых условиях (б)

При оценке токсичности ОГ дизелей используются и другие испытательные циклы, в той или иной степени отражающие реальные режимы работы в условиях эксплуатации. В Германии разработан 5-режимный испытательный цикл применительно к двигателям сельскохозяйственной техники [18]. Основным режимом этого цикла (3% времени работы) является режим с номинальной частотой вращения и высокой нагрузкой (около 85% полной нагрузки). Исследуется и режим холостого хода при частоте вращения коленчатого вала  $n = 0,4 n_{\text{ном}}$  (12% времени работы). Этот цикл не стандартизирован, но в ряде случаев он используется

для оценки токсичности дизелей сельскохозяйственных тракторов. В Европе дизели грузовых автомобилей грузоподъемностью более 3,5 т (для автобусов с числом посадочных мест свыше 9) до 2000 г. испытывались в стендовых условиях на установившихся режимах, соответствующих режимам 13-режимного цикла *ECE R49* (рис. 6, б) [19]. Этот испытательный цикл включает 13 установившихся режимов: три режима холостого хода с минимальной частотой вращения коленчатого вала  $n = (0,25...0,3)n_{\text{ном}}$  (всего 25% времени работы), пять нагрузочных режимов (с 10, 25, 50, 75, 100%-ной нагрузкой) при номинальной частоте вращения  $n_{\text{ном}}$  и пять нагрузочных режимов (с 10, 25, 50, 75, 100%-ной нагрузкой) при частоте вращения  $n_{\text{Mmax}} = (0,6...0,7) n_{\text{ном}}$ , соответствующей максимальному крутящему моменту двигателя. Доля номинального режима составляет 10% общего времени работы. При испытаниях на каждом из режимов определяются средние значения концентраций  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  в ОГ и эффективная мощность дизеля  $N_e$ . При оценке интегральной токсичности ОГ двигателя на режимах цикла *ECE R49* на каждом режиме определяются концентрации в ОГ токсичных компонентов ( $C_{\text{NO}_x}$ ,  $C_{\text{CO}}$ ,  $C_{\text{CH}_x}$ ) и рассчитываются их часовые массовые выбросы ( $E_{\text{NO}_x}$ ,  $E_{\text{CO}}$ ,  $E_{\text{CH}_x}$ ). Полученные значения вредных выбросов суммируют за весь цикл по каждому компоненту (с учетом коэффициентов  $K_i$ , отражающих долю времени каждого режима) и затем делят на условную среднюю мощность дизеля за испытательный цикл  $\Sigma(N_{ei} \cdot K_i)$  определяют удельные выбросы вредных веществ по формулам (1). Полученные значения удельных выбросов токсичных компонентов, отнесенные к единице вырабатываемой мощности ( $e_{\text{NO}_x}$ ,  $e_{\text{CO}}$ ,  $e_{\text{CH}_x}$ ,  $e_{\text{Tq}}$ ), сравниваются с предельно допустимыми нормами, представленными в табл. 3.

Проведенный анализ испытательных циклов, используемых для оценки токсичности ОГ дизелей различного назначения, и реальных распределений их режимов работы в условиях эксплуатации показал, что указанные испытательные циклы недостаточно точно отражают реальные эксплуатационные условия. Это не-

обходимо учитывать при оценке токсичности ОГ дизелей сельскохозяйственных машин.

Следует отметить, что в работе [8] токсичность ОГ оценена по методике определения интегральных показателей на режимах цикла *ECE R49* (см. рис. 6, б), более пригодного для оценки токсичности ОГ дизелей транспортного назначения. Для оценки токсичности ОГ дизелей сельскохозяйственных машин больше подходит 8-режимный испытательный цикл стандарта *ISO 8178—4* для двигателей внедорожных транспортных средств (см. рис. 6, а). Однако этот испытательный цикл недостаточно точно отражает реальное распределение режимов работы дизелей сельскохозяйственных машин, выполняющих основные технологические операции. Кроме того, в работе [8] не проведена оптимизация состава многокомпонентных смесевых биотоплив по обобщенному критерию, интегрально характеризующего показатели топливной экономичности и токсичности ОГ исследуемого дизеля. Это не позволяет однозначно определить наилучший состав многокомпонентного смесевых биотоплива. Поэтому необходима разработка методики оптимизации состава многокомпонентных смесевых биотоплив для дизелей сельскохозяйственных машин.

Серьезной проблемой, возникающей при оптимизации состава многокомпонентных смесевых биотоплив, является практическое отсутствие стандартизованных испытательных циклов для дизелей сельскохозяйственных машин, выполняющих основные технологиче-

ские операции. Поэтому при разработке указанной методики оптимизации необходимо не только определить вид целевой функции (критерия оптимизации), но и предложить испытательный цикл, адекватно отражающий реальное распределение режимов работы двигателей в реальных условиях эксплуатации.

Как отмечено выше, существует несоответствие между реальным распределением режимов работы дизелей сельскохозяйственных машин, выполняющих основные технологические операции (пахота, уборка урожая и др., см. рис. 5, б), и распределением долей времени работы двигателя на каждом режиме 13-режимного испытательного цикла *ECE R49* для автомобильных дизелей в стендовых условиях (см. рис. 6, б). Для оценки токсичности ОГ дизелей сельхозмашин в большей степени подходит испытательный цикл стандарта *ISO 8178—4* для дизельных двигателей внедорожных транспортных средств (см. рис. 6, а). При этом следует отметить некоторое несоответствие и этого испытательного цикла с режимами работы сельхозмашин. Так, в соответствии со стандартом *ISO 8178—4* время работы двигателя на режиме холостого хода при минимальной частоте вращения составляет 15%, а при выполнении сельхозмашиной основных технологических операций время работы двигателя на этом режиме близко к нулю. Суммарная доля режимов испытательного цикла *ISO 8178—4* при номинальной частоте вращения равна 45%, а, в частности, доля режимов, близких к режимам с номинальной

Таблица 3

Нормы токсичных выбросов с ОГ дизелей серийных автомобилей полной массой более 3,5 т

Нормативный документ	Год введения		Нормы выбросов, г/(кВт·ч)			
	в Европе	в России	CO	CH <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	ТЧ
ОСТ 37.001.234—81	—	1982	9,5	3,4	18,35	—
Правила ЕЭК ООН R 49	1989	1995	14,0	3,5	18,0	—
Правила ЕЭК ООН R 49—01	1991	1996	11,2	2,4	14,4	—
Правила R 49—02A (EURO-1)	1993	1999	4,5	1,1	8,0	0,36
Правила R 49—02B (EURO-2)	1997	2006	4,0	1,1	7,0	0,15
EURO-3	2000	2008	2,0	0,6	4,5	0,10
EURO-4	2005	2010	1,5	0,5	3,5	0,08
EURO-5	2008	2012	1,0	0,5	2,0	0,05

Примечание. «—» — параметр не нормируется; ТЧ — твердые частицы.

частотой вращения для дизеля типа СМД-31 комбайна «Дон-1500», в технологическом процессе уборки кукурузы составляет 51% (см. рис. 5, б).

Таким образом, различные нагрузочные режимы при номинальной частоте вращения коленчатого вала и близкие к ним скоростные режимы являются преобладающими режимами работы сельскохозяйственных машин, выполняющих основные технологические операции. Необходимо также учитывать, что наибольший расход ОГ, содержащих вредные вещества, также характерен для этих режимов. В связи с этим предлагается оценку токсичности ОГ дизелей сельскохозяйственных машин проводить с учетом выбросов вредных веществ на указанных режимах. Анализ распределения нагрузочных режимов при номинальной частоте вращения, представленных на рис. 5, б, для этих двигателей позволил предложить 4-режимный испытательный цикл, показанный на рис. 7, который включает четыре нагрузочных режима при номинальной частоте вращения, соответствующих нагрузкам 100, 75, 50 и 25%. Весовые коэффициенты этих режимов (доля времени работы на каждом режиме) равны соответственно 10, 40, 40 и 10%. Преимуществом применения этого испытательного цикла для оценки токсичности ОГ дизелей сельхозмашин является возможность использования экспериментальных данных, полученных на режимах 13-режимного испытательного цикла *ECE R49* для автомобильных дизелей (см. рис. 6, б). Следует отметить также сравнительно небольшой объем вычислений при определении интегральных показателей токсичности ОГ на режимах этого цикла в связи с тем, что число исследуемых режимов минимально (всего четыре режима).

Результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С на режимах предложенного испытательного цикла, полученные в работе [8], представлены в табл. 4. На основании результатов этих исследований определены интегральные показатели исследуемого дизеля на режимах предложенного 4-режимного испытательного цикла (см. рис. 7) по формулам (1)–(3). Полученные расчетные показатели дизеля приведены в табл. 5. Экспериментальные данные табл. 4 и 5 использованы для оптимизации состава смесового многокомпонентного биотоплива

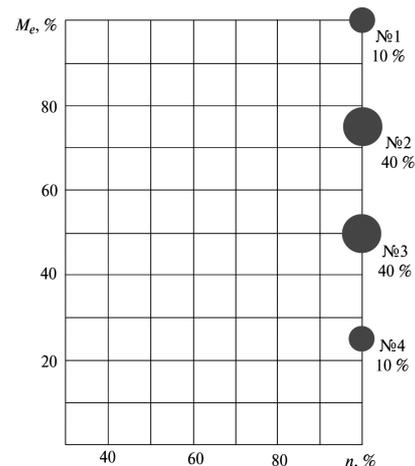


Рис. 7. Предлагаемый 4-режимный испытательный цикл для оценки токсичности ОГ дизелей сельхозмашин

для дизеля типа Д-245.12С, устанавливаемого и на сельскохозяйственные машины (на тракторы типа «Беларусь»).

Для проведения указанной оптимизации состава многокомпонентных биотоплив разработана методика, базирующаяся на составлении обобщенного комплексного критерия оптимизации, предложенного в работе [9]. Эта методика предусматривает формирование обобщенного критерия оптимальности  $J_0$  в виде суммы частных критериев, учитывающих основные показатели топливной экономичности и токсичности ОГ. В качестве частного критерия оптимальности, характеризующего топливную экономичность, предложено отношение эффективного КПД дизеля, работающего на ДТ ( $\eta_{e \text{ ДТ}}$ ), к эффективному КПД дизеля, работающего на рассматриваемом смесовом биотопливе ( $\eta_{e i}$ ). Необходимо отметить, что в настоящее время показатели токсичности ОГ стали одними из наиболее значимых показателей работы двигателей внутреннего сгорания [9, 10, 20, 21]. В качестве частных критериев, отражающих показатели токсичности ОГ, выбраны отношения концентраций оксидов азота, монооксида углерода и несгоревших углеводородов в ОГ дизеля, работающего на исследуемом смесовом биотопливе (соответственно  $C_{\text{NOx } i}$ ,  $C_{\text{CO } i}$ ,  $C_{\text{CHx } i}$ ), к соответствующим концентрациям дизеля, работающего на ДТ (соответственно  $C_{\text{NOx ДТ}}$ ,  $C_{\text{CO ДТ}}$ ,  $C_{\text{CHx ДТ}}$ ). При таком подходе к оптимизации состава смесового биотоплива выражение для обобщенного критерия оптимальности  $J_0$  принимает вид

$$\begin{aligned}
 J_o &= a_{\eta_e} J_{\eta_e} + a_{NOx} J_{NOx} + a_{CO} J_{CO} + a_{CHx} J_{CHx} = \\
 &= a_{\eta_e} \frac{\eta_{e\text{ДТ}}}{\eta_{ei}} + a_{NOx} \frac{C_{NOxi}}{C_{NOx\text{ДТ}}} + \\
 &+ a_{CO} \frac{C_{COi}}{C_{CO\text{ДТ}}} + a_{CHx} \frac{C_{CHxi}}{C_{CHx\text{ДТ}}}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

где  $a_{\eta_e}$ ,  $a_{NOx}$ ,  $a_{CO}$ ,  $a_{CHx}$  — весовые коэффициенты частных критериев оптимальности. При этом весовой коэффициент  $a_{\eta_e}$ , относящийся к эффективному КПД двигателя, принят равным единице, а весовые коэффициенты  $a_{NOx}$ ,  $a_{CO}$ ,  $a_{CHx}$ , характеризующие выброс нормируемых токсичных компонентов, определялись в виде отношений действительной эмиссии токсичных компонентов ОГ дизеля, работающего на дизельном топливе ( $e_{NOx}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CHx}$ ), к предельным значениям эмиссии, определяемым нормами на токсичность ОГ ( $e_{NOx\text{пр}}$ ,  $e_{CO\text{пр}}$ ,

$e_{CHx\text{пр}}$ ). При расчетных исследованиях весовые коэффициенты  $a_{NOx}$ ,  $a_{CO}$ ,  $a_{CHx}$  определялись при ограничениях на эти выбросы, накладываемых нормами *EURO-4*. С использованием принятых допущений получены следующие значения весовых коэффициентов частных критериев оптимальности:

$$\begin{aligned}
 a_{\eta_e} &= 1,0; \quad a_{NOx} = e_{NOx} / e_{NOx\text{пр}} = 6,630 / 3,5 = 1,89; \\
 a_{CO} &= e_{CO} / e_{CO\text{пр}} = 2,210 / 1,5 = 1,47; \\
 a_{CHx} &= e_{CHx} / e_{CHx\text{пр}} = 0,580 / 0,5 = 1,16. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Эти значения весовых коэффициентов приняты постоянными для всех исследуемых видов топлива и для всех исследуемых режимов работы.

Следует отметить, что по представленной методике оптимизации состава смесового биотоплива на режиме максимальной мощности дизель, работающий на дизельном топливе, имеет дымность ОГ  $K_x = 14,5\%$  по шкале Хар-

Таблица 4

Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ и многокомпонентных биотопливах на режимах 4-режимного цикла (рис. 7), при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$

Номер режима	$N_e$ , кВт	$M_e$ , Н·м	$G_p$ , кг/ч	$E_{NOx}$ , г/ч	$E_{CO}$ , г/ч	$E_{CHx}$ , г/ч
<i>Нефтяное дизельное топливо</i>						
1	79,9	318,1	19,70	566,8	91,9	29,4
2	59,3	236,1	15,40	366,1	86,5	26,3
3	40,7	162,0	11,18	252,3	87,5	28,3
4	20,5	81,6	7,26	134,3	135,4	39,8
<i>Смесь 85% ДТ + 5% РМ + 10% АИ-80</i>						
1	78,7	313,3	19,58	538,0	91,9	30,3
2	59,6	237,3	15,55	343,1	93,1	26,2
3	40,0	159,2	11,10	220,7	92,2	29,6
4	20,2	80,4	7,30	120,8	149,8	45,1
<i>Смесь 80% ДТ + 10% РМ + 10% АИ-80</i>						
1	75,4	300,2	19,25	525,2	96,1	42,3
2	57,8	230,1	15,51	308,1	99,7	36,5
3	37,7	150,1	10,75	196,4	94,9	36,5
4	20,5	81,6	7,47	106,2	148,3	52,6
<i>Смесь 70% ДТ + 20% РМ + 10% АИ-80</i>						
1	78,8	313,7	19,93	532,6	99,9	32,8
2	59,1	235,3	15,74	330,6	107,9	29,0
3	39,0	155,3	10,97	215,1	100,0	29,6
4	20,2	80,4	7,50	125,4	155,5	47,3

Таблица 5

Интегральные показатели дизеля Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ и многокомпонентных биотопливах, на режимах 4-режимного цикла (рис. 7)

Показатели дизеля	Топливо			
	ДТ	Смесь 85% ДТ + 5% РМ + 10% АИ-80	Смесь 80% ДТ + 10% РМ + 10% АИ-80	Смесь 70% ДТ + 20% РМ + 10% АИ-80
Условные показатели топливной экономичности дизеля на режимах 4-режимного цикла:				
эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)	266,35	268,41	275,71	273,24
эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	0,318	0,316	0,311	0,317
Интегральные удельные выбросы токсичных компонентов на режимах 4-режимного цикла, г/(кВт·ч):				
оксиды азота $e_{\text{NOx}}$	6,344	5,860	5,544	5,781
монооксид углерода $e_{\text{CO}}$	1,845	1,976	2,140	2,212
несгоревшие углеводороды $e_{\text{СНх}}$	0,575	0,600	0,810	0,640
Обобщенный критерий оптимальности $J_o$	5,52	5,54	6,01	5,77
Относительный обобщенный критерий оптимальности $J_{o\text{ отн}}$	1,000	1,004	1,089	1,045
Относительный частный критерий оптимальности по выбросам оксидов азота $J_{\text{NOx отн}}$	1,000	0,924	0,874	0,911

триджа (см. рис. 2), тогда, как допустимая дымность ОГ на этом режиме составляет  $K_x = 48,3\%$  по шкале Хартриджа. При работе дизеля на этом режиме на исследуемых смесевых биотопливах дымность ОГ еще ниже. Три других режима с меньшей нагрузкой 4-режимного цикла (см. рис. 7) отличаются ничтожно малой дымностью ОГ. В связи с этим выражение (4) для обобщенного критерия оптимальности  $J_o$  не содержит слагаемого, характеризующего дымность ОГ.

Сравнение токсичности ОГ и топливной экономичности дизеля, работающего на исследуемых топливах, проводилось с использованием относительного обобщенного критерия оптимальности  $J_{o\text{ отн}}$ , представляющего собой отношение критерия  $J_o$ , полученного для данного смесевоего топлива, к значению этого критерия  $J_{o\text{ ДТ}}$ , соответствующему работе на ДТ, т. е.

$$J_{o\text{ отн}} = J_o / J_{o\text{ ДТ}} \quad (6)$$

При анализе результатов исследований кроме относительного обобщенного критерия оптимальности  $J_{o\text{ отн}}$  введен показатель  $J_{\text{NOx отн}}$  — отношение удельного массового выброса наиболее значимого токсичного компонента ОГ оксидов азота  $e_{\text{NOxi}}$  дизеля, работающего на исследуемом биотопливе, к удельному массовому

выбросу оксидов азота  $e_{\text{NOx ДТ}}$  дизеля при его работе на дизельном топливе:

$$J_{\text{NOx отн}} = e_{\text{NOxi}} / e_{\text{NOx ДТ}} \quad (7)$$

Для проведения оптимизационных расчетов по дизелю Д-245.12С по выражениям (4)–(7) и экспериментальным данным табл. 4 получены результаты, приведенные в табл. 5 и на рис. 8. Они свидетельствуют о том, что перевод дизеля Д-245.12С с нефтяного ДТ на многокомпонентные биотоплива с добавкой бензина АИ-80 позволил заметно снизить выброс с ОГ оксидов азота (рис. 8, а). Так, при работе дизеля на режимах предложенного 4-режимного испытательного цикла и переходе с нефтяного дизельного топлива на смесь 80% ДТ, 10% РМ и 10% бензина АИ-80 достигнуто максимальное снижение выброса с ОГ оксидов азота — с 6,344 до 5,544 г/(кВт·ч), т. е. на 12,6%. Однако при этом увеличивается эмиссия монооксида углерода СО и несгоревших углеводородов СН<sub>х</sub>. Максимальное увеличение выброса с ОГ монооксида углерода — с 1,845 до 2,212 г/(кВт·ч), т. е. на 19,9% — отмечено при переводе дизеля на смесь 70% ДТ + 20% РМ + 10% АИ-80. Максимальный рост выброса с ОГ несгоревших углеводородов — с 0,575 до 0,810 г/(кВт·ч), т. е. на 40,9% — отмечен при переводе дизеля на смесь 80% ДТ + 10% РМ + 10% АИ-80. При этом на-

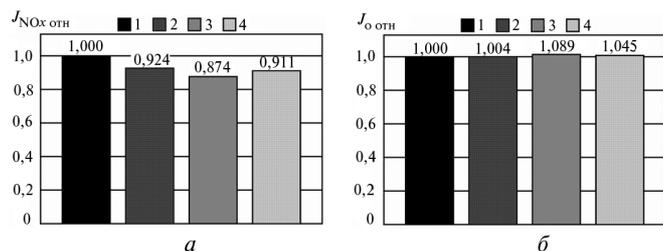


Рис. 8. Относительный частный критерий оптимальности по выбросам оксидов азота  $J_{NOx\ отн}$  (а) и относительный обобщенный критерий оптимальности  $J_{o\ отн}$  (б) и при работе дизеля типа Д-245С на различных топливах:

1 — ДТ; 2 — смесь 85% ДТ, 5% РМ и 10% бензина АИ-80; 3 — смесь 80% ДТ, 10% РМ и 10% бензина АИ-80; 4 — смесь 70% ДТ, 20% РМ и 10% бензина АИ-80

блюдается и максимальное снижение эффективного КПД дизеля — с 0,318 до 0,311, т. е. на 2,2%.

Предложенный относительный обобщенный критерий оптимальности  $J_{o\ отн}$  примерно одинаков для всех исследуемых топлив: его наименьшее значение ( $J_{o\ отн}=1,000$ ) соответствует работе дизеля Д-245.12С на нефтяном ДТ, а наибольшее значение ( $J_{o\ отн}=1,089$ ) — работе на смеси 80% ДТ + 10% РМ + 10% АИ-80 (рис. 8, б). Среди рассматриваемых смесевых биотоплив наилучшее сочетание параметров топливной экономичности и токсичности ОГ обеспечивает смесь 85% ДТ, 5% РМ и 10% АИ-80. При работе дизеля на этой смеси обобщенный критерий оптимальности  $J_{o\ отн}$  имеет наименьшее значение ( $J_{o\ отн}=1,004$ ) по сравнению с другими многокомпонентными биотопливами. В этом случае выброс оксидов азота снижается на 7,6%, выброс монооксида углерода увеличивается на 7,1%, выброс несгоревших углеводородов возрастает на 4,3%, эффективный КПД снижается на 0,6%.

Проведенные расчетные исследования подтвердили эффективность разработанной методики оптимизации состава многокомпонентных смесевых биотоплив для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин и эффективность использования этих топлив в отечественных дизелях.

## Литература

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

[2] Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г. *Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей*. Москва, Издательский центр ФГОУ ВПО МГАУ, 2008, 340 с.

[3] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. *Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания*. Москва, изд-во МАДИ (ТУ), 2000, 311 с.

[4] Гуреев А.А., Азев В.С., Камфер Г.М. *Топливо для дизелей. Свойства и применение*. Москва, Химия, 1993, 336 с.

[5] Кулиев Р.Ш., Ширинов Ф.Р., Кулиев Ф.А. Физико-химические свойства некоторых растительных масел. *Химия и технология топлив и масел*, 1999, № 4, с. 36—37.

[6] Марков В.А., Девянин С.Н., Быковская Л.И. Использование в дизелях многокомпонентных смесевых биотоплив. *Грузовик*. 2010, № 5, с. 41—47.

[7] Zhong S., Wyszynski M.L., Megaritis A., Yap D., Xu H. Experimental Investigation into HCCI Combustion Using Gasoline and Diesel Blended Fuels. *SAE Technical Papers*, 2005, no. 2005—01—3733, pp. 1—12.

[8] Марков В.А., Девянин С.Н., Шустер А.Ю. Работа транспортного дизеля на многокомпонентных биотопливах. *Автомобильная промышленность*. 2010, № 4, с. 12—15.

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

[10] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Системы топливоподачи и управления дизелей*. Москва, Изд-во «Легион-Автодата», 2005, 344 с.

[11] Костин А.К., Пугачёв Б.П., Кочинев Ю.Ю. *Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник*. Ленинград, Машиностроение, 1989, 284 с.

[12] Ждановский Н.С., Николаенко А.В., Шкрбак В.С., Сомина А.В. *Режимы работы двигателей энергонасыщенных тракторов*. Ленинград, Машиностроение, 1981, 240 с.

[13] Mayer A., Ulrich A., Czerwinski J., Matter U., Wyser M. Retention of Fuel Borne Catalyst Particles by Diesel Particle Filter Systems. *SAE Technical Papers*, 2003, no. 2003—01—0287, pp. 1—7.

[14] Капралов Б.И., Красильников А.С., Мазинг М.В. Оптимизация параметров топливной аппаратуры дизеля грузового автомобиля. *Двигателестроение*, 1987, № 5, с. 20—22.

[15] Взоров Б.А., Молчанов К.К., Трепенков И.И. Снижение расхода топлива сельскохозяйственными тракторами путем оптимизации режимов работы двигателей. *Тракторы и сельхозмашины*, 1985, № 6, с. 10—14.

[16] Зоробян С.Р., Лупачев П.Д., Кирилюк А.В., Жегалин О.И. Оптимизация системы регулирования тракторной моторной установки. *Тракторы и сельхозмашины*, 1989, № 7, с. 14—16.

[17] Парсаданов И.В. *Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия*. Харьков, Изд-во Харьковского политехнического института, 2003, 244 с.

[18] Krahl J., Vellguth G., Munack A., Stalder K., Bahadir M. Exhaust Gas Emissions and Environmental Effects by Use of Rape Seed Oil Based Fuels in Agricultural Tractors. *SAE Technical Papers*, 1996, no. 961847, pp. 1—14.

[19] Bosch: *Системы управления дизельными двигателями*. Москва, Изд-во «За рулем», 2004, 480 с.

[20] Кульчицкий А.Р. *Токсичность автомобильных и тракторных двигателей*. Владимир, изд-во Владимирского государственного университета, 2000, 256 с.

[21] Лиханов В.А., Сайкин А.М. *Снижение токсичности автотракторных дизелей*. Москва, Колос, 1994, 224 с.

## References

[1] 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 dvigatel'nykh* [The use of vegetable oils and fuels based on them in diesel engines]. Moscow, OOO NITs «Inzhener» publ., OOO «Oniko-M» publ., 2011. 536 p.

[2] Devianin S.N., Markov V.A., Semenov V.G. *Rastitel'nye masla i topliva na ikh osnove dlia dizel'nykh dvigatelei* [Vegetable oils and their consumption on the basis of for diesel engines]. Moscow, FGOU VPO MGAU publ., 2008. 340 p.

[3] L'otko V., Lukanin V.N., Khachiiian A.S. *Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatel'nykh vnutrennego sgoraniia* [The use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, MADI (TU) publ., 2000. 311 p.

[4] Gureev A.A., Azev V.S., Kamfer G.M. *Topливо dlia dizelei. Svoistva i primeneniie* [Fuel for diesel engines. Properties and Uses]. Moscow, Khimiia publ., 1993. 336 p.

[5] Kuliev R.Sh., Shirinov F.R., Kuliev F.A. *Fiziko-khimicheskie svoistva nekotorykh rastitel'nykh masel* [Physicochemical properties of certain vegetable oils]. *Khimiia i tekhnologiia topliv i masel* [Chemistry and Technology of Fuels and Oils]. 1999, no. 4, pp. 36–37.

[6] Markov V.A., Devianin S.N., Bykovskaia L.I. *Ispol'zovanie v dizeliakh mnogokomponentnykh smesevykh biotopliv* [Using Multipropellant Mixed Biofuels in Diesel Engines]. *Gruzovik* [Truck]. 2010, no. 5, pp. 41–47.

[7] Zhong S., Wyszynski M.L., Megaritis A., Yap D., Xu H. *Experimental Investigation into HCCI Combustion Using Gasoline and Diesel Blended Fuels*. *SAE Technical Papers*, 2005, no. 2005–01–3733, pp. 1–12.

[8] Markov V.A., Devianin S.N., Shuster A.Iu. *Rabota transportnogo dizelia na mnogokomponentnykh biotoplivakh* [Vehicle diesel engine operation on multipropellant mixed biofuels]. *Avtomobil'naia promyshlennost'* [Automotive industry]. 2010, no. 4, pp. 12–15.

[9] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelei* [Exhaust emissions of diesel engines]. Moscow, Bauman Press, 2002. 376 p.

[10] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Sistemy toplivopodachi i upravleniia dizelei* [Fuel system and engine control]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2005. 344 p.

[11] Kostin A.K., Pugachev B.P., Kochinev Iu.Iu. *Rabota dizelei v usloviakh ekspluatatsii: Spravochnik* [Work diesels are available: Manual]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1989. 284 p.

[12] Zhdanovskii N.S., Nikolaenko A.V., Shkrbak V.S., Sominich A.V. *Rezhimy raboty dvigatelei energonasyshchennykh traktorov* [Modes of the engine power tractors]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1981. 240 p.

[13] Mayer A., Ulrich A., Czerwinski J., Matter U., Wyser M. *Retention of Fuel Borne Catalyst Particles by Diesel Particle Filter Systems*. *SAE Technical Papers*, 2003, no. 2003–01–0287, pp. 1–7.

[14] Kapralov B.I., Krasil'nikov A.S., Mazing M.V. *Optimizatsiia parametrov toplivnoi apparatury dizelia gruzovogo avtomobilia* [Optimization of the parameters of diesel fuel injection equipment truck]. *Dvigatelistroyeniye* [Engine building]. 1987, no. 5, pp. 20–22.

[15] Vzorov B.A., Molchanov K.K., Trepnenkov I.I. *Snizhenie rashkoda topliva sel'skokhoziaistvennymi traktorami putem optimizatsii rezhimov raboty dvigatelei* [Reducing fuel consumption by agricultural tractors engine optimization activities]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and farm machinery]. 1985, no. 6, pp. 10–14.

[16] Zorobian S.R., Lupachev P.D., Kiriliuk A.V., Zhegalin O.I. *Optimizatsiia sistemy regulirovaniia traktornoj motornoj ustanovki* [Optimization of the control system of tractor motor installation]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and farm machinery]. 1989, no. 7, pp. 14–16.

[17] 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, Khar'kovskii politekhnicheskii institute publ., 2003. 244 p.

[18] Krahl J., Vellguth G., Munack A., Stalder K., Bahadir M. *Exhaust Gas Emissions and Environmental Effects by Use of Rape Seed Oil Based Fuels in Agricultural Tractors*. *SAE Technical Papers*, 1996, no. 961847, pp. 1–14.

[19] *Bosch: Sistemy upravleniia dizel'nykh dvigateliami* [Bosch: Diesel Engine Management Systems]. Moscow, Za rulem publ., 2004. 480 p.

[20] Kul'chitskii A.R. *Toksichnost' avtomobil'nykh i traktornykh dvigatelei* [The toxicity of automobile and tractor engines]. Vladimir, Vladimirskii gosudarstvennyi universitet publ., 2000. 256 p.

[21] Likhonov V.A., Saikin A.M. *Snizhenie toksichnosti avtotraktornykh dizelei* [Reduced toxicity of automotive diesel engines]. Moscow, Kolos publ., 1994. 224 p.

Статья поступила в редакцию 25.06.2013

## 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).

**БЫКОВСКАЯ Лариса Игоревна** (Москва) — аспирант кафедры «Тракторы и автомобили». Московский государственный агроинженерный университет (МГАУ) им. В.П. Горячкина (127550, Москва, Российская Федерация, Тимирязевская ул., 58, e-mail: lbykovskaya@yandex.ru).

## Information about the authors

**MARKOV Vladimir Anatol'evich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Thermophysics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

**DEVYANIN Sergey Nikolaevich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Trucks and Tractors» Department. Moscow State Agroengineering University n.a. V.P. Goryachkin (MSAU, Timiryazevskaya str., 58, 127550, Moscow, Russian Federation, e-mail: devta@rambler.ru).

**BYKOVSKAYA Larisa Igorevna** (Moscow) — Post-Graduate of «Trucks and Tractors» Department. Moscow State Agroengineering University n.a. V.P.Goryachkin (MSAU, Timiryazevskaya str., 58, 127550, Moscow, Russian Federation, e-mail: lbykovskaya@yandex.ru).