

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТЯНЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ

В.А. Марков<sup>1</sup>

Н.Д. Чайнов<sup>1</sup>

С.С. Лобода<sup>2</sup>

vladimir.markov58@yandex.ru

ndchainov@yandex.ru

st-loboda@yandex.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Компания TEN FLECS, Москва, г. Троицк, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены виды биотоплив, используемых в двигателях внутреннего сгорания. Приведены физико-химические свойства растительных масел и их смесей с нефтяным дизельным топливом, а также перспективы их применения в дизелях. Выполнен сопоставительный анализ вязкостей растительных масел и их смесей с нефтяным дизельным топливом. Подтверждено, что вязкость растительных масел существенно отличается от вязкости нефтяного дизельного топлива. Получены аппроксимационные зависимости вязкости этих смесей от состава топлива. Приведены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С на нефтяном дизельном топливе и его смесях с добавками растительных масел, при этом исследованы добавки рапсового и подсолнечного масел в нефтяное дизельное топливо. Показана возможность улучшения экологических показателей дизеля при использовании указанных смесевых биотоплив. Приведены зависимости выбросов с отработавшими газами двух наиболее значимых токсичных компонентов — оксида азота и сажи от содержания атомов кислорода в молекулах рассматриваемых смесевых биотоплив

### Ключевые слова

*Двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, растительное масло, рапсовое масло, подсолнечное масло, смесевое биотопливо, показатели токсичности отработавших газов*

Поступила в редакцию 05.11.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

**Перспективы использования биотоплив в дизелях.** В последние годы расширяется применение биотоплив в двигателях внутреннего сгорания. К наиболее распространенным биотопливам можно отнести биоэтанол, используемый в основном как присадка к автомобильным бензинам, и биодизельные топлива, производимые из растительных масел [1]. Применительно к условиям РФ биодизельные топлива целесообразно производить из рапсового (РМ) и подсолнечного (ПМ) масел [2, 3]. Эти топлива рассматриваются в качестве реальной альтернативы нефтяным моторным топливам в различных регионах мира — в Европе [4, 5], США, странах Центральной и Латинской Америки, в странах Юго-Восточной

Азии [6, 7]. Это объясняется простотой и экологичностью процесса получения растительных масел, их сравнительно невысокой стоимостью и приемлемой воспламеняемостью в условиях камеры сгорания (КС) дизеля. При их сгорании отмечается и снижение токсичности отработавших газов (ОГ) дизеля. В качестве сырья для производства биотоплив могут быть использованы непищевые растительные масла — технические, низкосортные, просроченные, а также использованные фритюрные масла [8–10].

Эти биотоплива нашли применение в автомобильных дизелях, в двигателях сельхозмашин, на железнодорожном транспорте, в стационарных энергетических установках [11–14]. При этом растительные масла используются как самостоятельное топливо для дизелей, в смесях с дизельным топливом (ДТ), перерабатываются в метиловый, этиловый или бутиловый эфиры, которые применяются как самостоятельные биотоплива или как смесевое топливо (в смеси с нефтяным дизельным топливом или альтернативными топливами). При использовании растительных масел и их производных в качестве моторного топлива возможны два пути — централизованное и децентрализованное производство биотоплив [2, 3]. Централизованное производство биотоплив заключается в переработке растительных масел в сложные эфиры (метиловый, этиловый, бутиловый) с их последующим использованием в дизелях любых марок. В этом случае произведенное в фермерских хозяйствах или агропромышленных комплексах масло поступает на завод для химической переработки, а затем на заправочные станции. Децентрализованное производство предусматривает использование в качестве моторного топлива «чистых» растительных масел или их смесей с нефтяным ДТ, что обычно реализуется непосредственно в агропромышленных комплексах, где имеются излишки масел и возможно использование биотоплива, производимого из собственного сырья. Это позволяет комплексно использовать сельскохозяйственную продукцию и сократить транспортные расходы. Кроме того, в этом случае исключается зависимость от поставщиков нефтепродуктов. Применение такого биотоплива в сельском хозяйстве позволяет обеспечить значительное замещение нефтепродуктов, поскольку они потребляют в целом ~ 5 млн т нефтяного ДТ, что составляет ~42 % общего потребления ДТ всеми отраслями экономики РФ [15]. Причем наиболее целесообразно использовать растительные масла в качестве экологической добавки к нефтяным ДТ. Перевод дизелей на смесевые биотоплива на основе нефтяного ДТ с небольшим содержанием растительного масла имеет ряд преимуществ по сравнению с работой на чистом растительном масле. В этом случае отпадает необходимость внесения конструктивных изменений в дизель и его системы и изменений исходных регулировок по цикловой подаче, углу опережения впрыскивания топлива и др. Это объясняется тем, что подбором состава смесей можно обеспечить свойства, близкие к свойствам нефтяного ДТ.

**Вязкость растительного масла и их смесей с ДТ.** Одной из основных проблем использования растительного масла в качестве топлива для дизелей является их повышенная вязкость [2, 3]. Она существенно влияет на параметры процесса топливоподачи, впрыскивания и распыливания топлива, ухудшая ка-

чество протекания этих процессов. В свою очередь, указанные процессы предопределяют параметры топливной экономичности и токсичности ОГ дизелей. По этой причине определенный интерес представляют исследования вязкости как самих растительных масел, так и их смесей с нефтяным ДТ.

В проведенных исследованиях вязкостных характеристик смесевых жидкостей использованы различные теоретические подходы, основанные на описании взаимодействия компонентов смеси [16–18]. Но получить полностью теоретические формулы, описывающие вязкостные характеристики смесей нефтяного ДТ с биотопливами, практически невозможно из-за сложности состава компонентов указанных топлив. Поэтому для описания вязкостных характеристик смесевых топлив обычно используют полуэмпирические формулы [18]. В предлагаемом исследовании использованы логарифмический и алгебраический подходы к аппроксимации экспериментальных данных по кинематической вязкости различных топлив. К первому подходу относится метод Ниссана и Грюнберга [18], позволяющий определить кинематическую вязкость смеси в виде

$$\ln v = \sum_i^n x_i \ln v_i + \sum_i^n \sum_{j>i}^n x_i x_j D_{ij} + \sum_i^n \sum_{j>i}^n \sum_{k>j}^n x_i x_j x_k D_{ijk} + \dots + D_{ij\dots n} \prod_i^n x_i, \quad (1)$$

где  $v$  — кинематическая вязкость смеси;  $v_i, v_j, v_k$  — кинематическая вязкость ее компонентов;  $x_i, x_j, x_k$  — их концентрации;  $D_{ij}, D_{ijk}, \dots, D_{ij\dots n}$  — коэффициенты, зависящие от температуры и концентрации компонентов в смеси и учитывающие взаимодействие между компонентами. Значения этих коэффициентов рассчитывались так:

$$D_{ij} = \frac{A_{ij}}{t} + B_{ij}, \quad D_{ijk} = \frac{A_{ijk}}{t^2} + B_{ijk}, \quad D_{ij\dots n} = \frac{A_{ij\dots n}}{t^n} + A_{ij\dots n}. \quad (2)$$

Коэффициенты  $A_{ij}, A_{ijk}, \dots, A_{ij\dots n}$  и  $B_{ij}, B_{ijk}, \dots, B_{ij\dots n}$ , входящие в выражения (2), определяются методом наименьших квадратов. Они могут быть заданы либо постоянными, либо зависящими от концентрации компонентов в смеси. Их взаимосвязь с концентрацией компонентов биотоплив определяется коэффициентом корреляции  $R$ . В этом случае описание зависимости вязкости смеси от температуры может быть задано в виде нелинейной суммы:

$$\ln v_t = A_t + \frac{B_t}{t} + \frac{C_t}{t^2} + D_t t \quad \text{или} \quad v_t = e^{A_t + \frac{B_t}{t} + \frac{C_t}{t^2} + D_t t}, \quad (3)$$

где коэффициенты  $A_t, B_t, C_t$  и  $D_t$  также могут быть либо постоянными, либо зависящими от концентрации компонентов в смеси. Во втором методе аппроксимации кинематической вязкости биотоплив использована формула

$$v = \sum_i^n \left[ x_i \left( A_i + \frac{B_i}{t} + C_i \right) + \frac{x_i}{2 - x_i} \left( D_i + \frac{E_i}{t} \right) \right], \quad (4)$$

где  $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i$  — постоянные коэффициенты, относящиеся к  $i$ -му компоненту и определяемые методом наименьших квадратов. С использованием этих ме-

тодов получены аппроксимационные формулы для рассматриваемых биотоплив. При проведении расчетных исследований использованы экспериментальные данные работы [19] по кинематической вязкости смесей нефтяного ДТ с РМ и ПМ при температуре  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  (табл. 1).

Таблица 1

**Кинематическая вязкость смесей нефтяного ДТ и растительных масел**

Растительное масло	Кинематическая вязкость смесей нефтяного ДТ с растительными маслами при различной концентрации (%) масел в смеси, мм <sup>2</sup> /с										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Рапсовое	4,00	5,50	7,20	9,30	12,30	16,90	22,40	30,20	41,50	58,60	63,90
Пальмовое	3,99	5,47	7,12	9,10	11,98	15,37	20,44	26,79	34,32	49,79	61,60

*Примечание.* Указано объемное содержание растительных масел в смеси.

Для этих двухкомпонентных смесей и при  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  формула (4) имеет вид

$$v_I = x_1 A_1^* + \frac{x_1}{2 - x_1} D_1^* + x_2 A_2^* + \frac{x_2}{2 - x_2} D_2^*, \quad (5)$$

где  $v_I$  — кинематическая вязкость смеси, определенная с использованием алгебраического метода;  $x_1, x_2$  — концентрации нефтяного ДТ и растительного масла;  $A_1^*, D_1^*, A_2^*, D_2^*$  — коэффициенты, описываемые следующими соотношениями:

$$A_i^* = A_i + \frac{B_i}{t} + C_i; \quad D_i^* = D_i + \frac{E_i}{t}$$

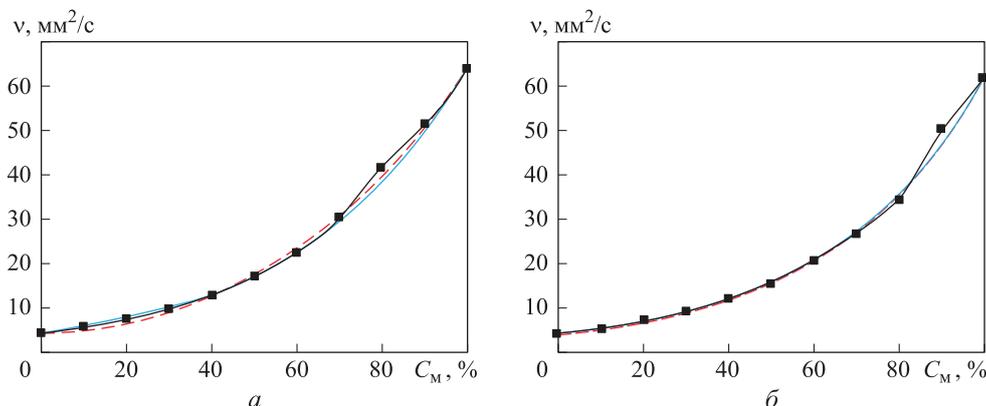
и являющиеся постоянными. С использованием данных табл. 1 и метода наименьших квадратов определены значения коэффициентов для смесей нефтяного ДТ и РМ:  $A_1^* = 11,170$ ;  $D_1^* = 52,730$ ;  $A_2^* = -38,657$ ;  $D_2^* = 42,657$ , а для смесей нефтяного ДТ и ПМ —  $A_1^* = -53,293$ ;  $D_1^* = 129,293$ ;  $A_2^* = 10,583$ ;  $D_2^* = -5,793$ .

При логарифмическом подходе к описанию зависимости кинематической вязкости  $v_{II}$  двухкомпонентных смесей нефтяного ДТ и растительных масел формула (1) принимает вид

$$\ln v_{II} = x_1 \ln v_1 + x_2 \ln v_2 + x_1 x_2 D_{12} \quad \text{или} \quad v_{II} = v_1^{x_1} v_2^{x_2} e^{x_1 x_2 D_{12}}, \quad (6)$$

где  $x_1, x_2$  — концентрации нефтяного ДТ и растительных масел;  $v_1$  и  $v_2$  — их кинематические вязкости. При температуре  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  коэффициент  $D_{12}$  имеет постоянное значение для каждого вида смеси. С использованием метода наименьших квадратов выполнен расчет коэффициентов  $D_{12}$ : для смеси ДТ и РМ  $D_{12} = 0,293$ , а для смеси ДТ и ПМ  $D_{12} = 0,119$ .

Для сравнения точности аппроксимации характеристик кинематической вязкости исследуемых смесей описанными ранее методами построены расчетные зависимости вязкости этих смесей от их состава (рис. 1). В табл. 2 приведены результаты оценки точности указанной аппроксимации исходных экспери-



**Рис. 1.** Зависимость кинематической вязкости  $\nu$  смесевых биотоплив от содержания масла  $C_M$  в смеси, построенные по экспериментальным данным  $\nu_0$  (черная сплошная), с использованием алгебраического  $\nu_I$  (штриховая) и логарифмического  $\nu_{II}$  (синяя сплошная) подходов к аппроксимации вязкостных характеристик для смесей ДТ с маслами:

$a$  — РМ;  $b$  — ПМ

ментальных точек. Данные рис. 1 и табл. 2 свидетельствуют о возможности использования обоих рассмотренных подходов к аппроксимации вязкостных характеристик исследуемых смесевых биотоплив, а также о преимуществах алгебраического подхода.

Таблица 2

**Оценка точности аппроксимации вязкостных характеристик исследуемых смесевых биотоплив различными методами**

Виды смесей	Алгебраический подход			Логарифмический подход		
	относительная максимальная погрешность, %	среднее отклонение, мм <sup>2</sup> /с	средняя квадратичная ошибка, мм <sup>2</sup> /с	относительная максимальная погрешность, %	среднее отклонение, мм <sup>2</sup> /с	средняя квадратичная ошибка, мм <sup>2</sup> /с
ДТ + РМ	27,23	0,51	2,42	15,14	0,98	2,85
ДТ + ПМ	5,74	0,13	0,97	5,89	0,12	0,99

В результате анализа зависимости вязкости смесей нефтяного ДТ с растительными маслами от состава этих смесей выявлено, что при объемном содержании РМ и ПМ до 10...15 % в указанных смесях, их вязкость не превышает 6 мм<sup>2</sup>/с, что соответствует требованиям ГОСТ 305–82 к вязкости дизельного топлива марки «Л» (летнее).

**Результаты экспериментальных исследований дизеля, работающего на растительных маслах и их смесях с ДТ.** Результаты исследований [2, 3] свидетельствуют о том, что даже небольшая добавка растительных масел и их производных (эфиров) обеспечивает заметное улучшение показателей токсичности ОГ. Указанные экспериментальные данные получены для дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5)

производства Минского моторного завода (ММЗ), работающего на смесях нефтяного ДТ с РМ и ПМ. Этот дизель с турбонаддувом мощностью  $N_e = 80$  кВт при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> выполнен рядным с числом цилиндров  $i_d = 4$ , рабочим объемом  $iV_h = 4,32$  л и водяным охлаждением. Степень сжатия двигателя  $\varepsilon = 16$ , диаметр цилиндров  $D = 110$  мм, ход поршня  $S = 125$  мм. Дизель оснащен топливным насосом высокого давления без устройства изменения угла опережения впрыскивания топлива. В дизеле использована КС типа ЦНИДИ (предложена Центральным научно-исследовательским дизельным институтом) и организовано объемно-плочное смесеобразование с частичным попаданием топливных струй на горячие боковые стенки КС. Более подробное описание дизеля Д-245.12С приведено в работах [2, 3].

На первом этапе дизель испытан на нефтяном ДТ марки «Л» по ГОСТ 305–82 и смеси ДТ и РМ с объемным содержанием последнего 0...60 %. Исследования проведены на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) и режимах 13-режимного цикла Правил 49 ЕЭК ООН (цикл ECE R49) с установочным углом опережения впрыскивания топлива  $\theta = 13^\circ$  п. к. в. до ВМТ и неизменным положением упора максимальной подачи топлива. Свойства исследуемых топлив приведены в табл. 3, а результаты этих исследований — в табл. 4.

Таблица 3

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Физико-химические свойства	Топлива				
	ДТ	РМ	80 % ДТ + + 20 % РМ	60 % ДТ + + 40 % РМ	40 % ДТ + + 60 % РМ
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	916	848	865	882
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,8	75,0	9,0	19,0	30,0
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	–	–	–
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42 500	37 300	41 500	40 400	39 400
Цетановое число	45	36	–	–	–
Температура самовоспламенения, °С	250	318	–	–	–
Температура помутнения, °С	–25	–9	–	–	–
Температура застывания, °С	–35	–20	–	–	–
Количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,5	14,0	13,6	13,2
Содержание, % масс.:					
С	87,0	77,0	85,0	83,0	81,0
Н	12,6	12,0	12,5	12,4	12,2
О	0,4	11,0	2,5	4,6	6,8
Общее содержание серы, % масс.	0,20	0,002	0,16	0,12	0,08
Коксуемость 10%-ного остатка, % масс.	0,2	0,4	–	–	–

Таблица 4

## Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на смесях ДТ и РМ

Показатели дизеля	Объемное содержание РМ в смеси с ДТ, %			
	0	20	40	60
Часовой расход топлива $G_T$ , кг/ч	18,81/12,10	19,94/13,24	20,30/13,71	20,70/13,73
Крутящий момент $M_e$ , Н·м	301/341	311/364	313/364	311/360
Дымность ОГ по шкале Хартриджа, $K_x$ , %	11,0/25,0	8,0/16,5	7,0/13,0	8,0/11,0
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч)	249,0/225,8	255,1/231,8	258,1/239,8	265,1/243,1
Эффективный КПД дизеля $\eta_e$	0,340/0,375	0,340/0,374	0,345/0,372	0,345/0,376
Условные (средние) показатели топливной экономичности дизеля на режимах 13-режимного цикла: – эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ г/(кВт·ч) – эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	247,20 0,343	254,38 0,341	259,40 0,343	272,23 0,336
Интегральные удельные выбросы токсичных компонентов на режимах 13-режимного цикла, г/(кВт·ч): – оксиды азота $e_{\text{NO}_x}$ – монооксид углерода $e_{\text{CO}}$ – несгоревшие углеводороды $e_{\text{CH}_x}$	7,442 3,482 1,519	7,159 3,814 0,965	7,031 3,880 0,949	6,597 3,772 1,075

*Примечание.* Числитель — показатели дизеля на режиме максимальной мощности ВСХ; знаменатель — на режиме максимального крутящего момента ВСХ.

На втором этапе дизель Д-245.12С испытан на смесях ДТ и ПМ с объемным содержанием последнего до 20 % ПМ. Методика испытаний была такой же, как и на первом этапе, но были изменены некоторые регулировки дизеля. Свойства ДТ, ПМ и их смесей приведены в табл. 5, а результаты этих исследований — в табл. 6.

Таблица 5

## Физико-химические свойства исследуемых топлив

Физико-химические свойства	Топлива				
	ДТ	ПМ	95 % ДТ + + 5 % ПМ	90 % ДТ + + 10 % ПМ	80 % ДТ + + 20 % ПМ
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	923	834,7	839,3	848,6
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,8	72,0	5,0	6,0	8,0
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,0	–	–	–
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42 500	37 000	42 100	41 900	41 400

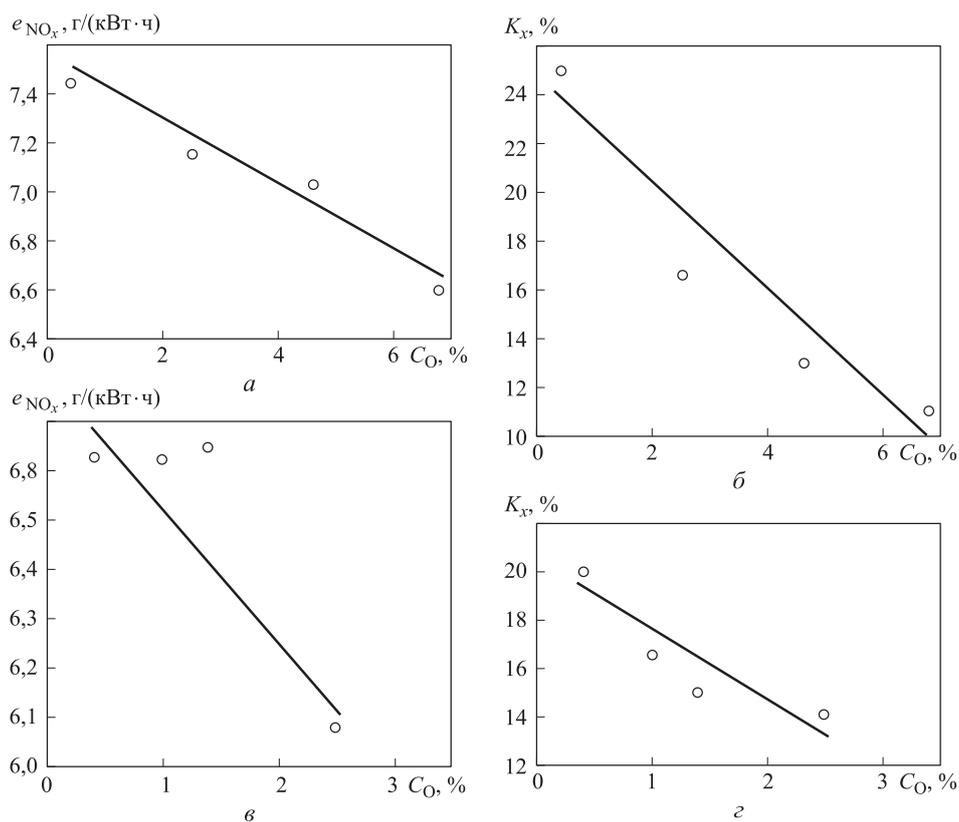
Физико-химические свойства	Топлива				
	ДТ	ПМ	95 % ДТ + + 5 % ПМ	90 % ДТ + + 10 % ПМ	80 % ДТ + + 20 % ПМ
Цетановое число	45	33	–	–	–
Температура самовоспламенения, °С	250	320	–	–	–
Температура помутнения, °С	–25	–7	–	–	–
Температура застывания, °С	–35	–18	–	–	–
Количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива, кг	14,3	12,4	14,2	14,1	13,9
Содержание, % масс.:					
С	87,0	77,6	86,5	86,1	85,1
Н	12,6	11,5	12,5	12,5	12,4
О	0,4	10,9	1,0	1,4	2,5
Общее содержание серы, % масс.	0,20	0,002	0,19	0,18	0,16
Коксуемость 10%-ного остатка, % масс.	0,2	0,5	–	–	–

Таблица 6

## Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на смесях ДТ и ПМ

Показатели дизеля	Объемное содержание ПМ в смеси с нефтяным ДТ, %			
	0	5	10	20
Часовой расход топлива $G_t$ , кг/ч	19,70/13,72	19,78/13,84	19,96/13,97	20,20/14,10
Крутящий момент $M_e$ , Н·м	317/368	318/368	316/367	313/364
Дымность ОГ по шкале Хартриджа, $K_x$ , %	14,5/20,0	12,5/16,5	12,0/15,0	11,0/14,0
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч)	246,8/222,6	248,1/224,6	251,3/226,9	256,2/231,1
Эффективный КПД дизеля $\eta_e$	0,343/0,381	0,345/0,386	0,342/0,379	0,339/0,376
Условные (средние) показатели топливной экономичности дизеля на режимах 13-режимного цикла: – эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч) – эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	230,52 0,367	245,91 0,353	246,09 0,349	248,94 0,349
Интегральные удельные выбросы токсичных компонентов на режимах 13-режимного цикла, г/(кВт·ч): – оксиды азота $e_{\text{NO}_x}$ – монооксид углерода $e_{\text{CO}}$ – несгоревшие углеводороды $e_{\text{CH}_x}$	6,630 2,210 0,580	6,626 2,146 0,563	6,649 2,091 0,580	6,078 2,257 0,647
<i>Примечание.</i> Числитель — показатели дизеля на режиме максимальной мощности ВСХ; знаменатель — на режиме максимального крутящего момента ВСХ.				

Полученные результаты испытаний дизеля Д-245.12С показывают, что с ростом содержания РМ и ПМ в смесях с нефтяным ДТ и соответствующим ростом содержания атомов кислорода в молекулах смесевое топлива заметно уменьшаются выбросы с ОГ двух наиболее значимых токсичных компонентов ОГ дизелей — оксидов азота и сажи (дымность ОГ) [20]. Так, в соответствии с данными рис. 2, а, б (также см. табл. 3 и 4) с ростом массового содержания атомов кислорода в смесях ДТ и РМ от 0,4 до 6,8 % (с ростом объемного содержания РМ в смесях с ДТ от 0 до 60 %) удельные массовые выбросы оксидов азота на режимах 13-режимного цикла уменьшились от 7,442 до 6,597 г/(кВт·ч), а дымность ОГ на режиме максимальной мощности — от 25 до 11 % по шкале Хартриджа. Результаты испытаний дизеля Д-245.12С на смесях ДТ и ПМ (рис. 2, в, г, см. табл. 5 и 6) свидетельствуют о том, что рост массового содержания атомов кислорода в смесях ДТ и ПМ от 0,4 до 2,5 % (рост объемного содержания ПМ в смесях с ДТ от 0 до 20 %) сопровождается снижением удельных массовых выбросов оксидов азота на режимах 13-режимного цикла от 6,630 до 6,078 г/(кВт·ч) и уменьшением дымности ОГ на режиме максимальной мощности — от 20 до 14 % по шкале Хартриджа.



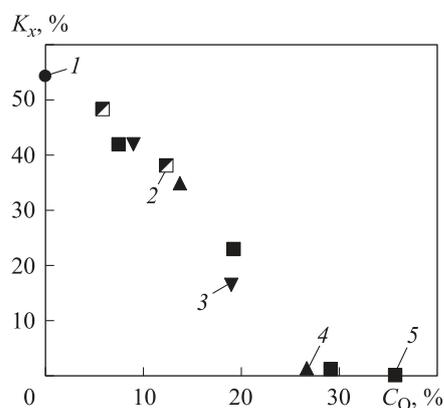
**Рис. 2.** Зависимость удельных массовых выбросов оксидов азота на режимах 13-режимного цикла  $e_{NO_x}$  (а, в) и дымности ОГ на режиме максимальной мощности  $K_x$  (б, г) дизеля Д-245.12С от содержания кислорода  $C_{O_2}$  в молекулах смесей нефтяного ДТ и РМ (а, б), нефтяного ДТ и ПМ (в, г)

Еще два нормируемых токсичных компонента ОГ дизелей — монооксид углерода CO и легкие несгоревшие углеводороды  $\text{C}_x\text{H}_x$  имеют значительно меньшую токсикологическую значимость. Так, в соответствии с данными работы [20], токсикологическая значимость CO,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{C}_x\text{H}_x$ , сажи (основным компонентом которой является углерод C) и оксидов серы  $\text{SO}_x$  оценивается как отношение 1 : 41,1 : 3,16 : 200 : 22. Кроме того, выброс CO и  $\text{C}_x\text{H}_x$  значительно снижается при использовании средств очистки ОГ (установкой нейтрализаторов) [20].

Приведенные на рис. 2 данные о снижении дымности ОГ хорошо согласуются с результатами работ [21, 22] по дымности ОГ дизеля, работающего на ДТ и различных эфирах. Видно (рис. 3), что дизель, работающий на нефтяном ДТ, имеет дымность, равную 55 % по шкале Хартриджа. Его перевод на эфиры, молекулы которых содержат более 25...30 % кислорода, сопровождается снижением  $K_x$  до значения менее 1% по шкале Хартриджа.

**Рис. 3.** Зависимость дымности ОГ  $K_x$  дизеля от содержания кислорода CO в молекулах различных топлив:

1 — нефтяное ДТ; 2 — дибутиловый эфир; 3 — этилгексилacetат; 4 — нормальный монобутиловый эфир этиленгликоля; 5 — диметилловый эфир диэтиленгликоля (кроме данных по эфирам на рисунке приведены данные по их смесям с нефтяным ДТ)



В результате анализа выявлено, что растительные масла можно использовать как экологические добавки к нефтяному дизельному топливу. Даже небольшая добавка растительных масел в нефтяное ДТ (в количестве до 10 %) приводит к увеличению до 1,2...1,4 % массового содержания атомов кислорода в молекулах смесового биотоплива, что сопровождается снижением на 13...17 % выбросов сажи и на 2...3 % оксидов азота с ОГ дизеля.

**Заключение.** Проведенные исследования позволяют сделать вывод об эффективности применения смесей нефтяного ДТ с растительными маслами — РМ и ПМ в отечественных дизелях без изменения их конструкции. В первую очередь — это дизели сельскохозяйственных машин, в которых могут применяться смеси нефтяного ДТ с техническими, низкосортными, просроченными, а также фритюрными маслами. Исследованные отличия вязкости смесей нефтяного ДТ с РМ и ПМ от аналогичных свойств нефтяных ДТ показали, что эти отличия не являются препятствием к применению смесей нефтяного ДТ и растительных масел в качестве моторных топлив. При объемном содержании РМ и ПМ в указанных смесях до 10...15 % их вязкость не превышает 6  $\text{мм}^2/\text{с}$ , что соответствует требованиям ГОСТ 305–82. Анализ результатов испытаний дизеля

типа Д-245.12С на смесях нефтяного ДТ с РМ и ПМ подтвердил возможность улучшения показателей токсичности ОГ, в первую очередь, снижения дымности ОГ и уменьшения эмиссии оксидов азота при использовании таких смесей. Даже небольшая добавка (до 10 %) растительных масел в нефтяное ДТ приводит к увеличению массового содержания атомов кислорода в молекулах смесового биотоплива, что сопровождается снижением выбросов сажи и оксидов азота с ОГ дизеля. Таким образом, растительные масла можно рассматривать как экологические добавки к нефтяному дизельному топливу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С.* Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ, 2000. 311 с.
2. *Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М.* Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания. М.: НИЦ «Инженер», 2016. 292 с.
3. *Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Семенов, А.В. Шахов, В.В. Багров.* М.: НИЦ «Инженер», 2011. 536 с.
4. *Knothe G., Krahl J., Gerpen J., eds.* The biodiesel handbook. AOCS Press, 2005. 286 p.
5. *Bozbas K.* Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the European Union // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2008. Vol. 12. No. 2. P. 542–552. DOI: 10.1016/j.rser.2005.06.001 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000614>
6. *Myo T.* The effect of fatty acid composition on the combustion characteristics of biodiesel. Japan: Kagoshima University, 2008. 171 p.
7. *Barnwal B.K., Sharma M.P.* Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2005. Vol. 9. No. 4. P. 363–378. DOI: 10.1016/j.rser.2004.05.007 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403210400067X>
8. *Utilization of waste vegetable oil methyl ester for diesel fuel / K. Hamasaki, H. Tajima, K. Takasaki, K. Satohira, M. Enomoto, H. Egawa // SAE Technical Paper Series.* 2001. No. 2001-01-2021. DOI: 10.4271/2001-01-2021
9. *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. P. 294–299. DOI: 10.1299/kikaib.66.294 URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/66/641/66\\_641\\_294/\\_article/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/66/641/66_641_294/_article/-char/en)
10. *Supple B., Howard-Hildige R., Gonzales-Gomez E., Leahy J.J.* The effect of steam treating waste cooking oil on the yield of methyl ester // *Journal of the American Oil Chemists' Society.* 2002. Vol. 79. No. 2. P. 175–178. DOI: 10.1007/s11746-002-0454-1
11. *Карташевич А.Н., Плотников С.А., Товстыка В.С.* Применение топлив на основе рапсового масла в тракторных дизелях. Киров: Авангард, 2014. 144 с.
12. *Макрокинетическая трансформация природных липидов для получения моторного топлива / А.Н. Иванкин, В.С. Болдырев, Ю.Н. Жилин, Г.Л. Олиференко, М.И. Бабурина, А.В. Куликовский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки.* 2017. № 5. С. 65–80. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-5-95-108

13. *Heavy-duty* diesel engine performance and emission measurements for biodiesel (from cooking oil) blends used in the ECOBUS project / F. Payri, V. Macian, J. Arregle, B. Tormos, J.L. Martínez // SAE Technical Paper Series. 2005. No. 2005-01-2205. DOI: 10.4271/2005-01-2205
14. *Impact* of using biodiesels of different origin and additives on the performance of a stationary diesel engine / A. Sendari, K. Fragioudakis, S. Kalligeros, S. Stournas, E. Lois // Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2000. Vol. 122. No. 4. P. 624–631. DOI: 10.1115/1.1289385
15. Уханов А.П., Уханов Д.А., Хохлова Е.А. Адаптация тракторного дизеля к работе на смешанном топливе // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 10. С. 14–16.
16. Eyring H. Viscosity, plasticity and diffusion as examples of absolute reaction rates // The Journal of Chemical Physics. 1936. Vol. 4. No. 4. P. 283–291. DOI: 10.1063/1.1749836
17. McAllister R.A. The viscosity of liquid mixtures // AIChE Journal. 1960. Vol. 6. No. 3. P. 427–431. DOI: 10.1002/aic.690060316
18. Viscosities of the ternary mixture (2-butanol + n-hexane + 1-butylamine) at 298.15 and 313.15 K / M. Dominguez, J.I. Pardo, I. Gascon, F.M. Royo, J.S. Urieta // Fluid Phase Equilibria. 2000. Vol. 169. No. 2. P. 277–292. DOI: 10.1016/S0378-3812(00)00332-0  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378381200003320>
19. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009. 240 с.
20. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
21. Curran H.J., Fisher E.M., Glaude P.A., Marinov N., et al. Detailed chemical kinetic modeling of diesel combustion with oxygenated fuels // SAE Technical Paper Series. 2001. No. 2001-01-0653. DOI: 10.4271/2001-01-0653
22. *Smokeless*, low NO<sub>x</sub>, high thermal efficiency and low noise diesel combustion with oxygenated agents as main fuel / N. Miyamoto, H. Ogawa, N.M. Nurun, K. Obata, T. Arima // SAE Technical Paper Series. 1998. No. 980506. DOI: 10.4271/980506

**Марков Владимир Анатольевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Чайнов Николай Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Лобода Станислав Сергеевич** — инженер-технолог компании TEN FLECS (Российская Федерация, 142191, Москва, г. Троицк, Промышленная ул., д. 26).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Марков В.А., Чайнов Н.Д., Лобода С.С. Физико-химические свойства нефтяных моторных топлив с добавками растительных масел и их влияние на показатели дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 5. С. 108–122.  
DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-108-122

---

**PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF PETROLEUM MOTOR  
FUELS WITH VEGETABLE OIL ADDITIVES AND THEIR EFFECT  
ON DIESEL PERFORMANCE**

**V.A. Markov<sup>1</sup>**  
**N.D. Chaynov<sup>1</sup>**  
**S.S. Loboda<sup>2</sup>**

vladimir.markov58@yandex.ru  
ndchainov@yandex.ru  
st-loboda@yandex.ru

<sup>1</sup> **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

<sup>2</sup> **TEN FLECS Company, Troitsk, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper considers types of biofuel for internal combustion engines. It lists physical and chemical properties of vegetable oils and blends of vegetable oil and petroleum diesel fuel, as well as the prospects of using them in diesel engines. We performed a comparative analysis of vegetable oil viscosities and viscosities of vegetable oil blends with petroleum diesel fuel. The study shows that vegetable oil viscosity is considerably different from that of petroleum diesel fuel. We derived approximate fittings for blend viscosities as functions of fuel composition. We present results of experimental investigations dealing with the D-245.12S diesel engine running on petroleum diesel fuel and blends with vegetable oil additives. We studied rapeseed and sunflower oil additives to petroleum diesel fuel. We demonstrate that it is possible to improve environmental performance of a diesel using the biofuel blends listed. The most important toxic components in diesel exhaust gases are nitrogen oxide and soot. We provide data on how the content of these components depends on the number of oxygen atoms in the molecules of the biofuel blends under consideration

**Keywords**

*Internal combustion engine, diesel engine, petroleum diesel fuel, vegetable oil, rapeseed oil, sunflower oil, biofuel blend, exhaust gas toxicity factors*

Received 05.11.2017

© BMSTU, 2018

---

**REFERENCES**

- [1] L'otko V., Lukanin V.N., Khachiyani A.S. *Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Using alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, MADI (TU) Publ., 2000. 311 p.
- [2] Markov V.A., Devyanin S.N., Zykov S.A., Gaydar S.M. *Biotopliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Biofuels for internal combustion engines]. Moscow, NITs "Inzhener" Publ., 2016. 292 p.
- [3] Markov V.A., Devyanin S.N., Semenov V.G., Shakhov A.V., Bagrov V.V. *Ispol'zovanie rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigatelyakh* [Using vegetable fat and fuel based on it in diesel engines]. Moscow, NITs "Inzhener" Publ., 2011. 536 p.
- [4] Knothe G., Krahl J., Gerpen J., eds. *The biodiesel handbook*. AOCS Press, 2005. 286 p.
- [5] Bozbas K. Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, no. 2, pp. 542–552. DOI: 10.1016/j.rser.2005.06.001  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000614>

- [6] Myo T. The effect of fatty acid composition on the combustion characteristics of biodiesel. Japan, Kagoshima University, 2008. 171 p.
- [7] Barnwal B.K., Sharma M.P. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005, vol. 9, no. 4, pp. 363–378. DOI: 10.1016/j.rser.2004.05.007  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403210400067X>
- [8] 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. DOI: 10.4271/2001-01-2021
- [9] 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. DOI: 10.1299/kikaib.66.294  
Available at: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/66/641/66\\_641\\_294/\\_article/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/66/641/66_641_294/_article/-char/en)
- [10] Supple B., Howard-Hildige R., Gonzales-Gomez E., Leahy J.J. The effect of steam treating waste cooking oil on the yield of methyl ester. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2002, vol. 79, no. 2, pp. 175–178. DOI: 10.1007/s11746-002-0454-1
- [11] Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Tovstyka V.S. Primenenie topliv na osnove rapsovogo masla v traktornykh dizelyakh [Used fuel based on rape oil in tractor diesel motors]. Kirov, Avangard Publ., 2014. 144 p.
- [12] Ivankin A.N., Boldyrev V.S., Zhilin Yu.N., Oliferenko G.L., Baburina M.I., Kulikovskiy A.V. Macrokinetic transformation of natural lipids for motor fuels production. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 5, pp. 65–80 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2017-5-95-108
- [13] Payri F., Macian V., Arregle J., Tormos B., Martínez J.L. Heavy-duty diesel engine performance and emission measurements for biodiesel (from cooking oil) blends used in the ECOBUS project. *SAE Technical Paper Series*, 2005, no. 2005-01-2205. DOI: 10.4271/2005-01-2205
- [14] Sendari A., Fragioudakis K., Kalligeros S., Stournas S., Lois E. Impact of using biodiesels of different origin and additives on the performance of a stationary diesel engine. *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, vol. 122, no. 4, pp. 624–631. DOI: 10.1115/1.1289385
- [15] Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Khokhlova E.A. Tractor diesel customization for mixed fuel burning. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2013, no. 10, pp. 14–16 (in Russ.).
- [16] Eyring H. Viscosity, plasticity and diffusion as examples of absolute reaction rates. *The Journal of Chemical Physics*, 1936, vol. 4, no. 4, pp. 283–291. DOI: 10.1063/1.1749836
- [17] McAllister R.A. The viscosity of liquid mixtures. *AIChE Journal*, 1960, vol. 6, no. 3, pp. 427–431. DOI: 10.1002/aic.690060316
- [18] Dominguez M., Pardo J.I., Gascon I., Royo F.M., Urieta J.S. Viscosities of the ternary mixture (2-butanol + n-hexane + 1-butylamine) at 298.15 and 313.15 K. *Fluid Phase Equilibria*, 2000, vol. 169, no. 2, pp. 277–292. DOI: 10.1016/S0378-3812(00)00332-0  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378381200003320>
- [19] Vasil'yev I.P. Vliyaniye topliv rastitel'nogo proiskhozhdeniya na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelya [Impact of plant fuels on ecological and economical parameters of diesel]. Lugansk, Izdat. VNU im. V. Dal'ya Publ., 2009. 240 p.

[20] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [Toxicity of diesel burnt gas]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 376 p.

[21] Curran H.J., Fisher E.M., Glaude P.-A., Marinov N.M., Pitz W.J., Westbrook C.K., Layton D.W., Flynn P.F., Durrett R.P., zur Loye A.O., Akinyemi O.C., Dryer F.L. Detailed chemical kinetic modeling of diesel combustion with oxygenated fuels. *SAE Technical Paper Series*, 2001, no. 2001-01-0653. DOI: 10.4271/2001-01-0653

[22] Miyamoto N., Ogawa H., Nurun N.M., Obata K., Arima T. Smokeless, low NO<sub>x</sub>, high thermal efficiency and low noise diesel combustion with oxygenated agents as main fuel. *SAE Technical Paper Series*, 1998, no. 980506. DOI: 10.4271/980506

**Markov V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Chaynov N.D.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Loboda S.S.** — Production Engineer, TEN FLECS Company (Promyshlennaya ul. 2b, Troitsk, Moscow, 142191 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Markov V.A., Chaynov N.D., Loboda S.S. Physical and Chemical Properties of Petroleum Motor Fuels with Vegetable Oil Additives and their Effect on Diesel Performance. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 5, pp. 108–122 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-108-122

---

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
press@bmstu.ru www.baumanpress.ru

---

Подписано в печать 27.09.2018  
Формат 70 × 108/16  
Усл.-печ. л. 10,7

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
baumanprint@gmail.com