

УДК 621.436

Исследование вязкостных характеристик биотоплив на основе растительных масел

Research of viscosity characteristics of biofuels based on vegetable oils

В. А. МАРКОВ¹, д-р техн. наук
С. Н. ДЕВЯНИН², д-р техн. наук
С. А. ЗЫКОВ², канд. техн. наук
Бовэнь СА¹, инж.

¹ Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, vladimir.markov58@yandex.ru

² Российский государственный аграрный
университет — МСХА имени К. А. Тимирязева,
Москва, Россия, zikov.sa@yandex.ru

V. A. MARKOV¹, DSc in Engineering
S. N. DEVYANIN², DSc in Engineering
S. A. ZYKOV², PhD in Engineering
Boven' SA¹, Engineer

¹ N. E. Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia,
vladimir.markov58@yandex.ru

² Russian State Agrarian University —
Moscow K. A. Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russia, zikov.sa@yandex.ru

Истощение нефтяных месторождений и ухудшение экологической обстановки требуют поиска альтернативных источников энергии. Актуальность статьи обусловлена необходимостью более широкого использования альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. В качестве перспективных альтернативных топлив для дизельных двигателей рассматриваются топлива, получаемые из растительных масел и животных жиров. Эти топлива вырабатываются из возобновляемого сырья и отличаются хорошими экологическими свойствами. Показаны преимущества использования топлив растительного происхождения в качестве моторных топлив. Одна из проблем применения топлив на основе растительных масел — повышенная вязкость. Исследованы вязкостные характеристики смесей нефтяного дизельного топлива и растительных масел. Рассмотрены различные растительные масла: рапсовое, подсолнечное, соевое, кукурузное, горчичное, а также масло, получаемое из растения *Pongamia Pinnata*. Предложена методика аппроксимации вязкостных характеристик смесевых биотоплив в виде алгебраического многочлена. В расчетных исследованиях использованы экспериментальные данные о вязкости указанных растительных масел и их смесей с нефтяным дизельным топливом. Получены аппроксимирующие зависимости этих экспериментальных данных с использованием известного логарифмического и предложенного алгебраического методов. Проведен анализ погрешности аппроксимации экспериментальных данных по вязкости биотоплив с использованием указанных методов. Приведены показатели дизеля Д-245.12С, работающего на смесях рапсового и подсолнечного масел с нефтяным дизельным топливом. Отмечена эффективность предложенной методики аппроксимации вязкостных характеристик смесей нефтяного дизельного топлива с растительными маслами. Методика обладает высокой точностью и может быть использована для аппроксимации вязкостных характеристик различных смесевых топлив.

Ключевые слова: дизельный двигатель; нефтяное дизельное топливо; альтернативное топливо; растительное масло; рапсовое масло; подсолнечное масло; соевое масло; кукурузное масло; горчичное масло; масло растения *Pongamia Pinnata*; смесевое биотопливо; вязкость.

Depletion of oil fields and environmental deterioration demand the search of alternative sources of energy. Actuality of the article is driven by the need for increased use of alternative fuels in internal combustion engines. As advanced alternative fuels for diesel engines, the article considers fuels extracted from vegetable oils and animal fatty substances. These fuels are produced from renewable feedstocks and characterized by good environmental qualities. The advantages of use of vegetable origin fuels as motor fuel are shown. One of the problems of use of fuels based on vegetable oils is their increased viscosity. The viscosity characteristics of mixtures of petroleum diesel fuel and vegetable oils are investigated. Various vegetable oils, namely rapeseed oil, sunflower oil, soybean oil, corn oil, mustard oil, as well as oil extracted from the *Pongamia Pinnata* plant are considered. A method of approximation of viscosity characteristics of mixed biofuels in the form of algebraic polynomial is suggested. Experimental data on viscosity of these oils and their mixtures with petroleum diesel fuel are used in calculation researches. Approximating dependences of these experimental data with the use of the familiar logarithmic method and a suggested algebraic method are obtained. The analysis of approximation accuracy of experimental data on viscosity of biofuel is carried out with the use of mentioned methods. Parameters of the D-245.12S diesel engine operating on mixtures of rapeseed and sunflower oils with petroleum diesel fuel are presented. The effectiveness of the suggested method of approximation of viscosity characteristics of petroleum diesel fuel and vegetable oils mixtures is shown. The method is characterized by high accuracy and can be used for the approximation of viscosity characteristics of various fuel mixtures.

Keywords: diesel engine; petroleum diesel fuel; alternative fuel; vegetable oil; rapeseed oil; sunflower oil; soybean oil; corn oil; mustard oil; *Pongamia Pinnata* oil; biofuel mixture; viscosity.

Введение

В последние годы в связи с обострением энергетического кризиса и ростом дефицита нефтяных энергоносителей повышается интерес к биодизельным топливам [1, 2]. Это обусловлено не только возможностью замещения нефтепродуктов альтернативными топливами, но и лучшими экологическими характеристиками биотоплив [3, 4].

К биодизельным топливам относятся растительные масла, их производные (эферы), а также смеси биотоплив с нефтяным дизельным топливом (ДТ). Это возобновляемые и биоразлагаемые биотоплива. Их применение в дизельных двигателях значительно уменьшает выбросы вредных веществ с отработавшими газами (ОГ), в первую очередь выбросы твердых частиц и легких несгоревших углеводородов.

Возможность использования различных альтернативных топлив в дизельных двигателях во многом определяется близостью их физико-химических свойств к аналогичным свойствам нефтяного ДТ. Важнейшие характеристики альтернативных топлив — плотность, вязкость, сжимаемость [4—6]. Эти физические свойства растительных масел и их смесей с нефтяным ДТ оказывают заметное влияние на параметры процессов топливоподачи, впрыскивания и распыливания, а также последующих процессов смесеобразования и сгорания [4, 6].

Высокие плотность и вязкость этих топлив, подаваемых в камеру сгорания (КС) штатной системой топливоподачи дизеля, становятся причиной увеличения их цикловой подачи и часового расхода по сравнению с нефтяным ДТ. Повышенная плотность растительных масел и топлив на их основе приводит к увеличению дальности струи распыливаемого топлива. Увеличение длины струи распыливаемых биотоплив усугубляется их худшей самовоспламеняемостью (увеличением периода задержки воспламенения). В результате за период задержки воспламенения струи распыливаемого растительного масла достигают стенок КС, часть топлива, попадающая на стенки, не сгорает полностью, уменьшается доля объемного смесеобразования, могут наблюдаться потеря подвижности поршневых колец и загрязнение моторного масла.

Для устранения указанных недостатков желательно использовать биотоплива, имеющие свойства, близкие к свойствам штатных нефтяных ДТ. Приближение свойств биотоплив к свойствам традиционного ДТ достигается при использовании смесей растительных масел с нефтяными ДТ, что обеспечивает необходимое качество рабочих процессов дизелей и их требуемые эксплуатационные показатели.

Цель исследования

В дизельных двигателях сельхозмашин достаточно широко используются смесевые биотоплива с добавлением растительных масел. Эти кислородсодержащие добавки позволяют значительно улучшить экологические показатели дизеля. Поэтому определенный интерес представляет исследование зависимости вязкости таких смесей от их состава.

Следует отметить, что уже известны работы, посвященные экспериментальному определению вязкости

смесевых топлив и получению эмпирических формул для описания их вязкостных характеристик [7—10]. Вместе с тем в последние годы проведены исследования применения в дизелях смесевых биотоплив с добавлением некоторых растительных масел, которые ранее для этих целей не использовались [3, 4, 11, 12]. В ряде работ исследованы возможности применения в дизелях многокомпонентных смесевых биотоплив [4].

Таким образом, в связи с появлением новых видов используемых смесевых биотоплив и необходимостью получения простых и достоверных эмпирических формул, описывающих вязкость таких топлив, представляется целесообразным проведение дополнительных исследований, направленных на получение математического описания их вязкостных характеристик.

Цель исследования состоит в разработке методики аппроксимации опытных данных по вязкости смесевых биотоплив, получаемых путем смешивания нефтяного ДТ и различных растительных масел, использовании этой методики для математического описания вязкостных характеристик таких смесей, а также оценке точности аппроксимации.

Материалы и методы

В уже проведенных исследованиях вязкостных характеристик смесевых жидкостей использованы различные теоретические подходы, основанные на описании взаимодействия компонентов смеси [13—15]. Но получение полностью теоретических формул, описывающих вязкостные характеристики смесевых биотоплив — смесей нефтяного ДТ и растительных масел, — практически невозможно в связи со сложным составом двух указанных компонентов. Поэтому для описания вязкостных характеристик смесевых биотоплив используют полуэмпирические формулы [15].

В представленной работе для описания вязкостных характеристик смесей нефтяного ДТ и растительных масел использованы известный логарифмический и предложенный авторами алгебраический аппроксимационные подходы.

К первому подходу относится метод Грюнберга и Ниссана [15], позволяющий определить кинематическую вязкость смеси как:

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

где D_{ij} , D_{ijk} , ..., $D_{ij\dots n}$ — коэффициенты, зависящие от температуры и концентрации компонентов смеси.

Значения коэффициентов D_{ij} , D_{ijk} , ..., $D_{ij\dots n}$ рассчитываются по формулам:

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

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

$$\ln v = A_{\text{дт1}} + \frac{B_{\text{дт1}}}{t} + C_{\text{дт1}}t, \quad (3)$$

где коэффициенты A, B и C также могут быть заданы либо постоянными, либо зависящими от концентрации компонентов смеси.

Второй эмпирический подход, разработанный авторами статьи, предполагает описание нелинейной зависимости кинематической вязкости смесевых топлив от их состава и температуры в виде алгебраического соотношения:

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

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

В этом подходе кинематическая вязкость чистого ДТ определяется по формуле:

$$v = A_{\text{дт2}} + \frac{B_{\text{дт2}}}{t} + C_{\text{дт2}}t. \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

Два названных метода использованы для получения аппроксимационных зависимостей для вязкости различных смесевых биотоплив. При проведении расчет-

ных исследований использованы экспериментальные данные работы [3] по кинематической вязкости смесей нефтяного ДТ с некоторыми растительными маслами при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ (табл. 1).

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

$$v_1 = x_1 A_1^* + \frac{x_1}{2-x_1} D_1^* + x_2 A_2^* + \frac{x_2}{2-x_2} D_2^*, \quad (6)$$

где x_1, x_2 — концентрации нефтяного ДТ и растительного масла; $A_1^*, D_1^*, A_2^*, D_2^*$ — постоянные коэффициенты, описываемые соотношениями:

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

$$D_i^* = D_i + \frac{E_i}{t}.$$

С использованием исходных данных табл. 1 и метода наименьших квадратов определены значения этих коэффициентов, приведенные в табл. 2.

При логарифмическом подходе к описанию зависимости кинематической вязкости двухкомпонентных смесей нефтяного ДТ с растительными маслами формула (1) принимает вид:

$$\ln(v_{\text{II}}) = x_1 \ln(v_1) + x_2 \ln(v_2) + x_1 x_2 D_{12}, \quad (7)$$

или

$$v_{\text{II}} = v_1^{x_1} v_2^{x_2} e^{x_1 x_2 D_{12}}, \quad (8)$$

где x_1, x_2 — концентрации нефтяного ДТ и растительного масла; v_1, v_2 — кинематическая вязкость нефтяного ДТ и растительного масла.

Таблица 1

Кинематическая вязкость смесей нефтяного ДТ с растительными маслами при различной концентрации масел в смеси

Концентрация масла, %	Кинематическая вязкость смеси, мм ² /с											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Растительное масло												
Рапсовое масло (РМ)	4	5,5	7,2	9,3	12,3	16,9	22,4	30,2	41,5	58,6	63,9	
Подсолнечное масло (ПМ)	3,99	5,47	7,12	9,1	11,98	15,37	20,44	26,79	34,32	49,79	61,6	
Соевое масло (СМ)	4,91	6,04	7,31	10,13	15,85	20,6	26,7	33,2	42,3	59,5	73,9	
Кукурузное масло (КМ)	4	5,56	7,64	9,58	13,43	17,9	23,8	30,1	39,1	55,2	69,3	
Горчичное масло (ГМ)	4,79	6,5	8	10,8	15,2	20,2	25,6	34,6	46,2	57	76	
Масло Pongamia Pinnata	3,94	5,7	6,9	8,3	15,2	16,5	22,4	31,4	52,1	65,5	90,8	

Таблица 2

Значения коэффициентов формулы (6) для смесей нефтяного ДТ с различными растительными маслами

Коэффициент	ДТ + РМ	ДТ + ПМ	ДТ + СМ	ДТ + КМ	ДТ + ГМ	ДТ + Pongamia Pinnata
A_1^*	11,17	-53,293	-57,171	-42,471	-54,945	-128,02
D_1^*	52,73	129,293	126,471	116,371	116,545	218,82
A_2^*	-38,657	10,583	16,332	2,928	17,213	42,066
D_2^*	42,657	-5,793	-12,332	1,982	-13,223	-38,126

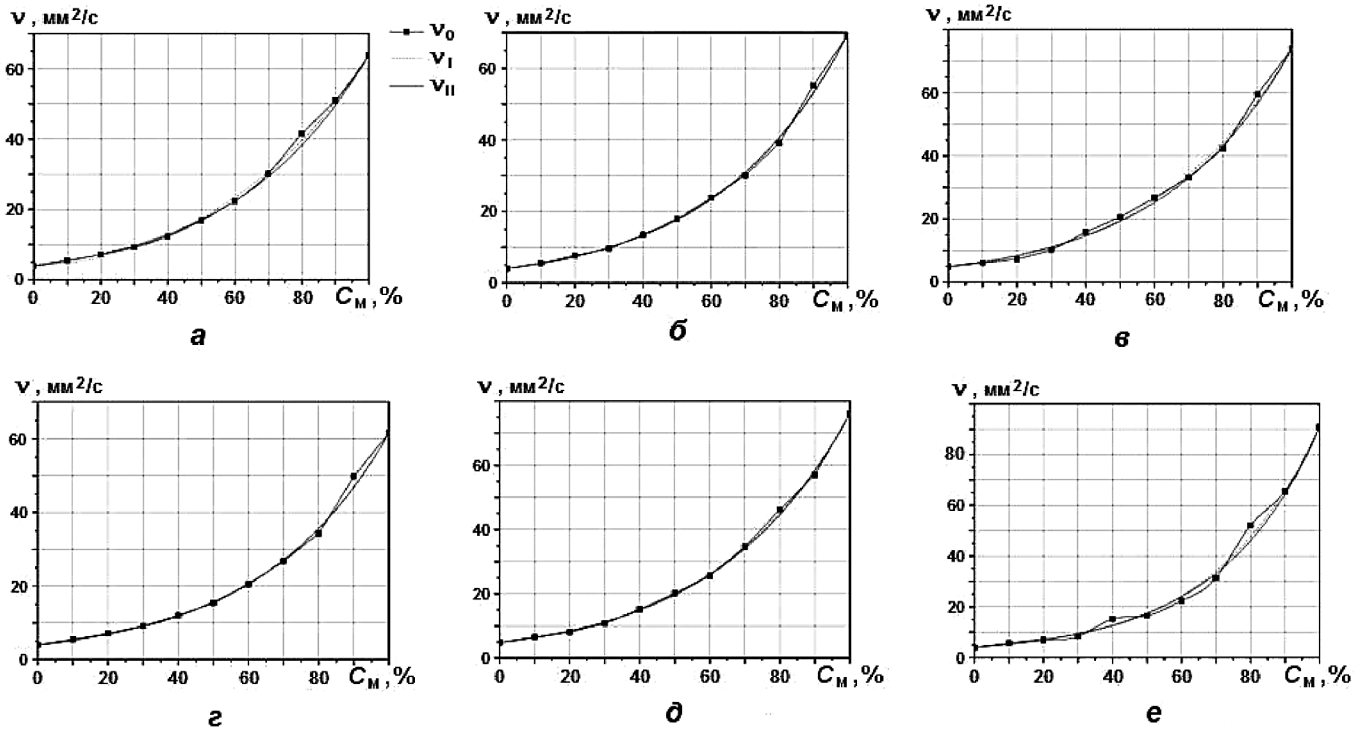


Рис. 1. Зависимости кинематической вязкости смесей нефтяного ДТ с рапсовым (а), кукурузным (б), соевым (в), подсолнечным (г), горчичным (д) маслами и маслом растения *Pongamia pinnata* (е) от содержания указанных масел в смесях:

v_0 — исходные экспериментальные данные (см. табл. 1); v_I — характеристики, полученные с использованием предложенного алгебраического подхода; v_{II} — характеристики, полученные с использованием логарифмического подхода

При $t = 20^\circ\text{C}$ коэффициент D_{12} имеет постоянную величину для каждого вида смеси. С помощью метода наименьших квадратов проведен расчет коэффициента D_{12} для смесей нефтяного ДТ с различными растительными маслами, результаты которого представлены в табл. 3.

Для сравнения точности аппроксимации характеристик кинематической вязкости исследуемых смесей описанными выше методами построены расчетные зависимости вязкости этих смесей от их состава, приведенные на рис. 1.

В табл. 4 представлены результаты оценки точности аппроксимации — величины максимальной относительной погрешности, средней погрешности и среднеквадратической ошибки полученных аппроксимационными методами характеристик кинематической вязкости относительно исходных данных.

Данные рис. 1 и табл. 4 свидетельствуют о возможности использования обоих подходов к аппроксимации вязкостных характеристик исследуемых смесевых биотоплив, а также о некоторых преимуществах предложенного алгебраического подхода.

Таблица 3

Значения коэффициента D_{12} формул (7) и (8) для смесей нефтяного ДТ с различными растительными маслами

Коэффициент	ДТ + РМ	ДТ + ПМ	ДТ + СМ	ДТ + КМ	ДТ + ГМ	ДТ + <i>Pongamia Pinnata</i>
D_{12}	0,293	0,119	0,245	0,042	0,002	-0,324

Приведенные выше данные по вязкости исследуемых смесевых биотоплив — смесей нефтяного ДТ с различными растительными маслами — свидетельствуют о большом диапазоне изменения кинематической вязкости этих смесей: примерно от $4\text{ мм}^2/\text{с}$ для нефтяного ДТ до $90\text{ мм}^2/\text{с}$ для чистых растительных масел. При переходе от чистого ДТ к рассматриваемым смесям изменяются и другие физико-химические свойства, такие как плотность, поверхностное натяжение, сжимаемость, теплотворная способность, цетановое число (табл. 5, 6) [4, 16].

Разница в свойствах рассматриваемых биотоплив не может не отразиться на показателях дизелей, работающих на этих топливах. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований [4, 16] дизеля типа Д-245.12С (4ЧН 11/12,5) на смесях нефтяного ДТ марки "Л" по ГОСТ 305—82 с рапсовым (рис. 2) и подсолнечным (рис. 3) маслами. Этот дизель производства Минского моторного завода устанавливают на малотоннажные грузовые автомобили ЗиЛ-5301 "Бычок", а его модификации — на автобусы Павловского автомобильного завода и тракторы "Беларус" Минского тракторного завода.

По представленным на рис. 2 и 3 характеристикам необходимо отметить, что применение в этом дизеле смесей нефтяного ДТ с растительными маслами значительно уменьшает дымность ОГ на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ), а также позволяет сократить выбросы оксидов азота и легких несгоревших углеводородов с ОГ дизеля.

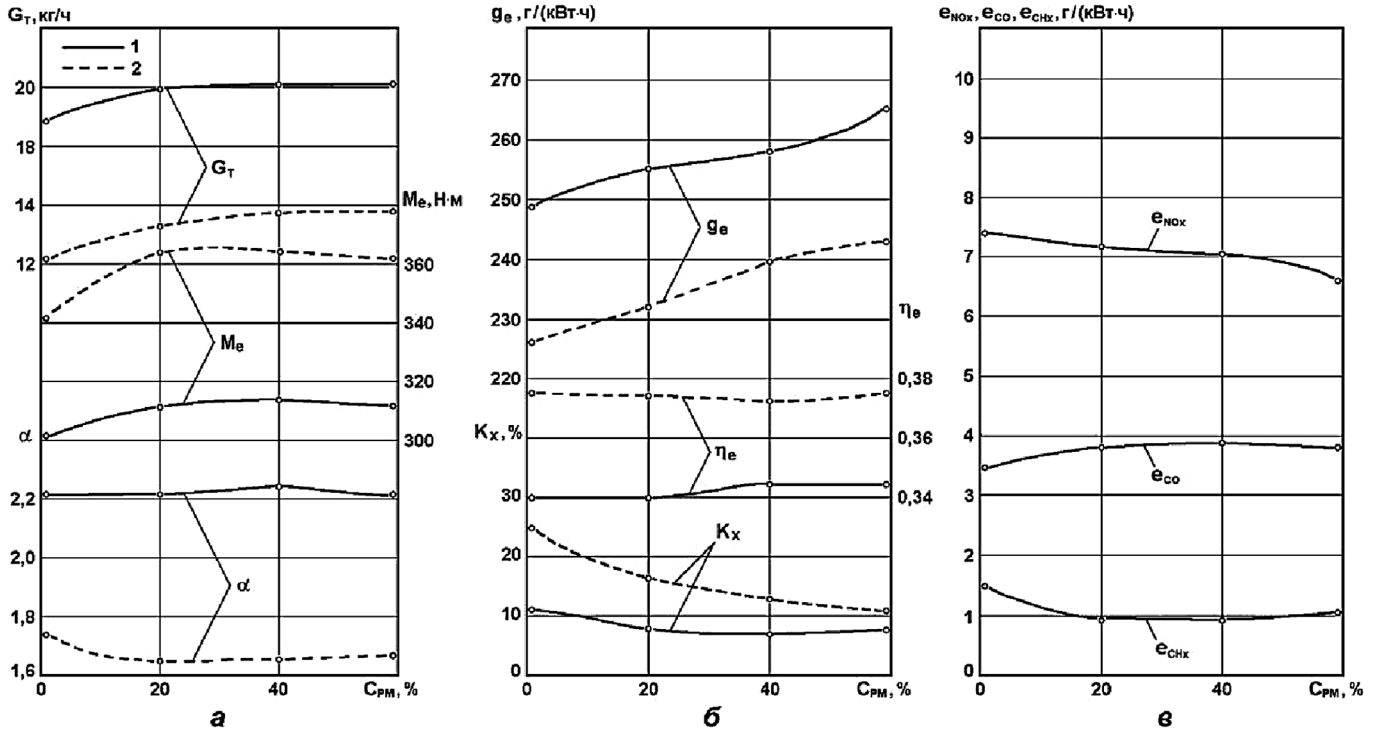


Рис. 2. Зависимости часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e и коэффициента избытка воздуха α на режимах ВСХ (а), удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_x на режимах ВСХ (б), удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NOx} , монооксида углерода e_{CO} и несгоревших углеводородов e_{CH} с ОГ на режимах 13-режимного цикла (в) дизеля Д-245.12С от содержания РМ в смешевом биотопливе C_{PM} :

1 — на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; 2 — на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

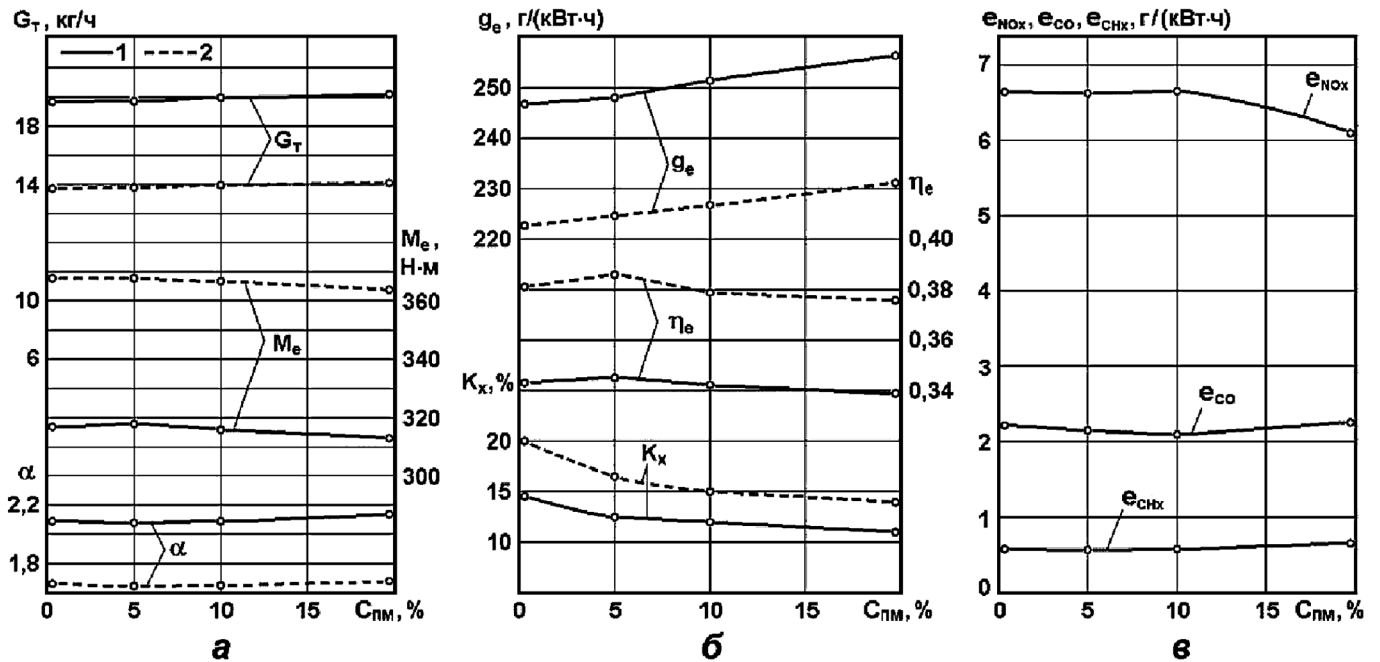


Рис. 3. Зависимости часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e и коэффициента избытка воздуха α на режимах ВСХ (а), удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_x на режимах ВСХ (б), условного эффективного КПД $\eta_{e \text{ усл}}$ и удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NOx} , монооксида углерода e_{CO} и несгоревших углеводородов e_{CH} с ОГ на 13-режимном цикле (в) дизеля Д-245.12С от содержания ПМ в смешевом биотопливе C_{PM} :

1 — на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; 2 — на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Оценка точности аппроксимации вязкостных характеристик исследуемых смесевых биотоплив различными методами

Виды смесей	Предложенный алгебраический подход			Логарифмический подход		
	Относительная максимальная погрешность, %	Среднее отклонение, мм ² /с	Среднеквадратическая ошибка, мм ² /с	Относительная максимальная погрешность, %	Среднее отклонение, мм ² /с	Среднеквадратическая ошибка, мм ² /с
ДТ + РМ	27,234	0,511	2,422	15,141	0,982	2,847
ДТ + ПМ	5,74	0,13	0,97	5,89	0,12	0,99
ДТ + СМ	10,802	0,007	1,114	16,304	0,315	1,265
ДТ + КМ	3,974	0,074	0,835	4,195	0,012	0,832
ДТ + ГМ	3,896 125	0,051 85	0,657 517	6,074 25	0,064 671	0,711 148
ДТ + Pongamia Pinnata	18,442	0,079	1,91	15,876	0,416	2,163

Таблица 5

Физико-химические свойства нефтяного ДТ и его смесей с рапсовым маслом

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

Примечание: "—" — свойства не определялись; для смеси ДТ и РМ указано объемное процентное содержание компонентов.

Таблица 6

Физико-химические свойства нефтяного ДТ и его смесей с подсолнечным маслом

Физико-химические свойства	ДТ	ПМ	95 % ДТ + 5 % ПМ	90 % ДТ + 10 % ПМ	80 % ДТ + 20 % ПМ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	923	834,7	839,3	848,6
Кинематическая вязкость, мм ² /с, при:					
20 °С	3,8	72	5	6	8
40 °С	2,4	31	—	—	—
100 °С	1	8	—	—	—
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33	—	—	—
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	42 500	37 000	42 100	41 900	41 400
Цетановое число	45	33	—	—	—
Температура самовоспламенения, °С	250	320	—	—	—
Температура помутнения, °С	-25	-7	—	—	—
Температура застывания, °С	-35	-18	—	—	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг	14,3	12,4	14,2	14,1	13,9
Содержание, % мас.:					
С	87	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	1,4	2,5
Общее содержание серы, % мас.	0,2	0,002	0,19	0,18	0,16
Коксуемость 10 %-го остатка, % мас.	0,2	0,5	—	—	—

Примечание: "—" — свойства не определялись; для смеси ДТ и ПМ указано объемное процентное содержание компонентов.

Заключение

1. При исследованиях вязкостных характеристик биотоплив на основе растительных масел рассмотрены различные растительные масла — рапсовое, подсолнечное, соевое, кукурузное, горчичное, а также масло, получаемое из растения *Pongamia Pinnata*.

2. Предложена методика аппроксимации вязкостных характеристик смесевых биотоплив в виде алгебраического многочлена. В расчетных исследованиях использованы экспериментальные данные о вязкости указанных растительных масел и их смесей с нефтяным ДТ. Получены аппроксимирующие зависимости этих экспериментальных данных с использованием известного логарифмического и предложенного алгебраического методов.

3. Предложенная методика аппроксимации вязкостных характеристик смесей нефтяного ДТ с растительными маслами отличается высокой точностью и может быть использована для аппроксимации вязкостных характеристик различных смесевых топлив, включая многокомпонентные биотоплива.

4. Применение в дизеле типа Д-245.12С смесей нефтяного ДТ с растительными маслами значительно уменьшает дымность ОГ на режимах ВСХ, а также позволяет сократить выбросы оксидов азота и легких несгоревших углеводородов с ОГ дизеля.

Литература и источники

1. **Льотко В., Луканин В. Н., Хачиян А. С.** Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.

2. **Александров А. А., Архаров И. А., Багров В. В.** и др. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / Под ред. А. А. Александрова, В. А. Маркова. М.: ООО НИЦ "Инженер", ООО "Оника-М", 2012. 791 с.

3. **Васильев И. П.** Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009. 240 с.

4. **Марков В. А., Девянин С. Н., Семенов В. Г.** и др. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях. М.: ООО НИЦ "Инженер", 2011. 536 с.

5. **Марков В. А., Девянин С. Н., Мальчук В. И.** Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 360 с.

6. **Грехов Л. В., Ивашенко Н. А., Марков В. А.** Системы топливopодачи и управления дизелей: Учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Легион-Автодата, 2005. 344 с.

7. **Goering C. E., Schwab A. W., Daugherty M. J.** et al. Fuel properties of eleven oil fuels // *SAE Technical Paper Series*. 1981, vol. 81-3579, pp. 1—7. DOI: 10.13031/2013.33748.

8. **Kapseu C., Kayem G. J., Balesdent D.** et al. The viscosity of cottonseed oil, fractionation solvents and their solutions // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1991, vol. 68, no. 2, pp. 128—130. DOI: 10.1007/BF02662333.

9. **Erhan S. Z., Asadauskas S., Adhvaryu A.** Correlation of viscosities of vegetable oil blends with selected esters and hydrocarbons // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2002, vol. 79, no. 11, pp. 1157—1161. DOI: 10.1007/s11746-002-0620-5.

10. **Fasina O. O., Hallman H., Craig-Schmidt M.** et al. Predicting temperature-dependence viscosity of vegetable oils from fatty acid composition // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2006, vol. 83, no. 10, pp. 899—903. DOI: 10.1007/s11746-006-5044-8.

11. **Senthil Kumar M., Ramesh A., Nagalingam B.** Experimental investigations on a jatropha oil methanol dual fuel engine // *SAE Technical Paper Series*. 2001, no. 2001-01-0153, pp. 1—7. DOI: 10.4271/2001-01-0153.

12. **Kalam M. A., Masjuki H. H.** Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil // *SAE Technical Paper Series*. 2005, no. 2005-01-3697, pp. 1—7. DOI: 10.4271/2005-01-3697.

13. **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.

14. **McAllister R. A.** The viscosity of liquid mixtures // *AIChE Journal*. 1960, vol. 6, no. 3, pp. 427—431. DOI: 10.1002/aic.690060316.

15. **Dominguez M., Pardo J. I., Gascon I. G.** et al. 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.

16. **Марков В. А., Девянин С. Н., Зыков С. А.** и др. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания. М.: ООО НИЦ "Инженер" (Союз НИО), 2016. 292 с.

References

1. **L'otko V., Lukanin V. N., Khachiyani A. S.** *Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University Publ., 2000, 311 p.

2. **Aleksandrov A. A., Arkharov I. A., Bagrov V. V., Gayvoronskiy A. I., Grekhov L. V., Devyanin S. N., Ivashchenko N. A., Markov V. A.** *Al'ternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Alternative fuels for internal combustion engines]. Under the editorship of A. A. Aleksandrov, V. A. Markov. Moscow, "NITs "Inzhener" LLC, "Onika-M" LLC Publ., 2012, 791 p.

3. **Vasil'ev I. P.** *Vliyanie topliv rastitel'nogo proiskhozhdeniya na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelya* [Effect of plant fuels on the environmental and economic performance of diesel engine]. Lugansk, V. Dal' East Ukrainian National University Publ., 2009, 240 p.

4. **Markov V. A., Devyanin S. N., Semenov V. G., Shakhov V. A., Bagrov V. V.** *Ispol'zovanie rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigatelyakh* [Using vegetable oils and fuels based on them in diesel engines]. Moscow, "NITs "Inzhener" LLC Publ., 2011, 536 p.

5. **Markov V. A., Devyanin S. N., Mal'chuk V. I.** *Vpryskivaniye i raspylivaniye topliva v dizelyakh* [Fuel injection and spraying in diesel engines]. Moscow, N. E. Bauman Moscow State Technical University Publ., 2007, 360 p.

6. **Grekhov L. V., Ivashchenko N. A., Markov V. A.** *Sistemy toplivopodachi i upravleniya dizelya* [Fuel supply systems and control systems of diesel engines]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005, 344 p.

7. **Goering C. E., Schwab A. W., Daugherty M. J., Pryde E. H., Keakin A. J.** Fuel properties of eleven oil fuels. *SAE Technical Paper Series*, 1981, vol. 81-3579, pp. 1—7. DOI: 10.13031/2013.33748.

8. **Kapseu C., Kayem G. J., Balesdent D., Schuffenecker L.** The viscosity of cottonseed oil, fractionation solvents and their solutions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1991, vol. 68, no. 2, pp. 128—130. DOI: 10.1007/BF02662333.

9. **Erhan S. Z., Asadauskas S., Adhvaryu A.** Correlation of viscosities of vegetable oil blends with selected esters and hydrocarbons. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2002, vol. 79, no. 11, pp. 1157—1161. DOI: 10.1007/s11746-002-0620-5.

10. **Fasina O. O., Hallman H., Craig-Schmidt M., Clements C.** Predicting temperature-dependence viscosity of vegetable oils from fatty acid composition. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2006, vol. 83, no. 10, pp. 899—903. DOI: 10.1007/s11746-006-5044-8.

11. **Senthil Kumar M., Ramesh A., Nagalingam B.** Experimental investigations on a jatropha oil methanol dual fuel engine. *SAE Technical Paper Series*, 2001, no. 2001-01-0153, pp. 1—7. DOI: 10.4271/2001-01-0153.

12. **Kalam M. A., Masjuki H. H.** Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil. *SAE Technical Paper Series*, 2005, no. 2005-01-3697, pp. 1—7. DOI: 10.4271/2005-01-3697.

13. **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.

14. **McAllister R. A.** The viscosity of liquid mixtures. *AIChE Journal*, 1960, vol. 6, no. 3, pp. 427—431. DOI: 10.1002/aic.690060316.

15. **Dominguez M., Pardo J. I., Gascon I. G., 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.

16. **Markov V. A., Devyanin S. N., Zikov S. A., Gaydar S. M.** *Bioplivna dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Biofuels for internal combustion engines]. Moscow, "NITs "Inzhener" LLC Publ., 2016, 292 p.