

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСЕВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ БИОТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ И ИХ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ

В.А. Марков¹

Н.Д. Чайнов¹

С.С. Лобода²

vladimir.markov58@yandex.ru

ndchainov@yandex.ru

st-loboda@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² TENSLECS, Троицк, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены виды биотоплив и направления их использования в двигателях внутреннего сгорания. Показано, что для дизелей наиболее перспективным является использование биотоплив, получаемых из растительных масел. В сельском хозяйстве экономически целесообразно применение смесевых дизельных биотоплив. Проведен анализ физико-химических свойств растительных масел и их смесей с дизельным топливом. Исследована воспламеняемость нефтяного дизельного топлива, рапсового и подсолнечного масел в камере сгорания дизеля. Воспламеняемость смесевых дизельных биотоплив с небольшими добавками растительных масел (до 10 %) практически не отличается от воспламеняемости нефтяных дизельных топлив. Однако использование этих топлив приводит к снижению дымности отработавших газов на 13...17 % и уменьшению эмиссии оксидов азота на 2...3 %

Ключевые слова

Двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, растительное масло, рапсовое масло, подсолнечное масло, смесевое биотопливо, воспламеняемость

Поступила в редакцию 11.12.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Виды биотоплив и направления их использования в дизелях. Направления и тенденции дальнейшего развития энергетики в значительной степени определяются ее обеспеченностью первичными энергетическими ресурсами и их экологическими характеристиками. В настоящее время в двигателях внутреннего сгорания используют в основном топлива нефтяного происхождения. Для этих целей расходуется более 50 % общего количества добываемой нефти [1]. При этом следует отметить неизбежность постепенного истощения мировых запасов нефти, используемой для производства моторных топлив. В настоящее время установленные мировые запасы нефти превышают 1,2 триллиона баррелей [2]. При современном уровне потребления энергоресурсов заметное истощение месторождений жидких ископаемых углеводородов может наступить уже в ближайшие 50–70 лет. Повсеместная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания в первую очередь в транспортных энергетических установках приводит к значительному загрязнению атмосферы вредными веществами, образующимися

при сгорании нефтяных моторных топлив [3]. Это требует поиска альтернативных экологически чистых моторных топлив.

Среди таких альтернативных топлив наиболее перспективные — биотоплива, производимые из возобновляемых сырьевых ресурсов [2]. В первую очередь это биоэтанол и биодизельные топлива. В ряде стран (США, Германия, Бразилия и др.) указанные биотоплива производят в промышленных масштабах и широко применяют на транспорте. Как правило, при этом используются смеси биотоплив с нефтяными моторными топливами. Значительная часть пахотных земель в РФ не обрабатывается и может быть использована для производства сырья, из которого получают биотоплива. Для этих же целей могут быть использованы почвы на территориях, прилегающих к промышленным зонам, автомобильным магистралям, объектам энергетики с неблагоприятной экологической обстановкой. Применительно к дизелям перспективными являются биотоплива, производимые из растительных масел. К масличным культурам относится более 150 видов растений, вырабатывающих растительные масла. Наибольшее промышленное значение в РФ имеют подсолнечное (ПМ) и рапсовое (РМ) масла [2, 3].

Следует отметить экологичность биотоплив, получаемых из растительных масел. Ввиду незначительного содержания серы в растительных маслах и их производных (10...15 *ppm*, или 0,0010...0,0015 % по объему) выбросы отработавших газов (ОГ) дизелей, работающих на биодизельном топливе, практически не содержат оксидов серы, которые, попадая в атмосферу, образуют кислоты, способствующие выпадению кислотных дождей. Отсутствие в растительных маслах и их эфирах полициклических ароматических углеводородов, являющихся канцерогенами и вызывающих онкологические заболевания, приводит к их очень малому выбросу с ОГ двигателей, работающих на биотопливах. При попадании биодизельного топлива в почву и водные бассейны происходит его быстрое разложение в течение нескольких недель.

Растительные масла могут использоваться как самостоятельное топливо для дизелей, в смесях с нефтяным дизельным топливом (ДТ), перерабатываются в метиловый, этиловый или бутиловый эфиры, которые применяются как самостоятельные биотоплива или как смесевые топлива (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 применение в качестве моторного топлива «чистых» растительных масел или их смесей с нефтяным ДТ.

Свойства растительных масел и их смесей с дизельным топливом. Возможность использования растительных масел в качестве моторных топлив

определяется составом и строением их молекул. Эти масла состоят в основном (на 95...97 %) из триацилглицеридов (рис. 1) — органических соединений, сложных эфиров глицерина и различных жирных кислот, а также моно- и диацилглицеридов. В свою очередь, ацилглицериды содержат молекулы различных жирных (карбоновых) кислот, связанных с молекулой глицерина $C_3H_5(OH)_3$ [4–6]. Растительные масла включают в себя в основном жирные кислоты с четным числом атомов углерода (например, C_{14} , C_{16} , C_{18} и др.). Среди этих жирных кислот присутствуют как ненасыщенные (олеиновая, линолевая, линоленовая и др.), так и насыщенные кислоты (миристиновая, пальмитиновая, стеариновая и др.). Молекулы насыщенных жирных кислот не имеют двойных связей, а в ненасыщенных кислотах присутствуют одна-три двойные связи.

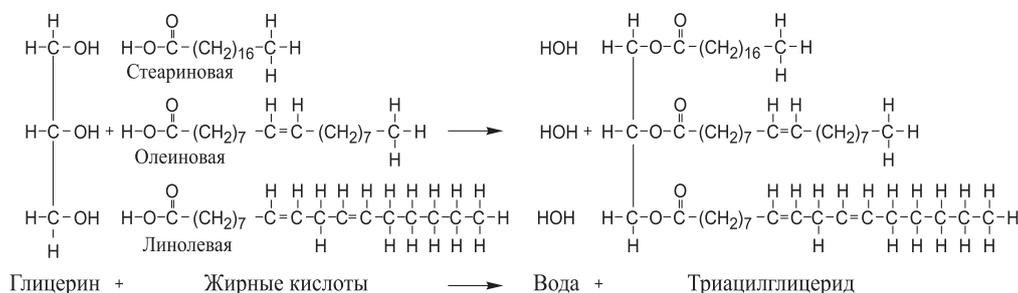


Рис. 1. Схема образования триацилглицеридов растительных масел

Жирнокислотный состав растительного масла зависит от сорта сельскохозяйственной культуры, места ее произрастания, способа извлечения масла и его очистки. Содержание в однотипных растительных маслах различных жирных кислот может изменяться в широких пределах. Эти отличия состава сопоставимы с отличиями жирнокислотного состава разнотипных масел (например, рапсового и соевого). Об этом свидетельствует приведенный в табл. 1 жирнокислотный состав РМ и ПМ различного состава [2, 7].

Одна из важнейших характеристик моторных топлив — кривые их фракционной разгонки. При снятии этих характеристик выделяют температуру начала перегонки (начала кипения), температуру перегонки 10, 50, 90 % топлива и температуру окончания перегонки (конца кипения), соответствующую перегонке 96 или 98 % топлива. Кривые фракционной разгонки некоторых моторных топлив (ДТ, бензина, топлива широкого фракционного состава, смесей ДТ с РМ), представленные на рис. 2 [2, 7], свидетельствуют о том, что РМ имеет существенно более тяжелый фракционный состав по сравнению с нефтяным ДТ. Так, температура начала перегонки ДТ марки «Л» (ГОСТ 305–82) (кривая 3) составляет 190 °С, а аналогичная температура РМ (кривая 7) — 280 °С. Следует отметить, что исследуемое РМ и его смеси с ДТ при повышении температуры более 330...340 °С подвергаются термическому разложению: появляются фракция зеленого цвета и густой едкий дым.

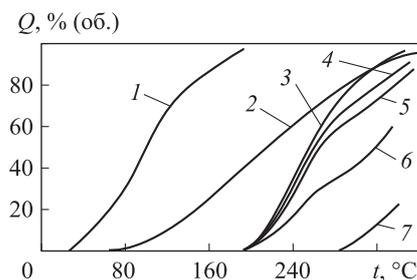
Таблица 1

Жирнокислотный состав РМ и ПМ

Наименование кислоты, условная формула состава (указывает число атомов углерода в молекуле кислоты и число двойных связей)	Массовая доля жирных кислот в маслах, %				
	Рапсовое	Рапсовое низкоэруковое	Подсолнечное	Подсолнечное высокоолеиновое	Подсолнечное со средним содержанием олеиновой кислоты
Лауриновая (С 12:0)	0	0	0-0,1	0	0
Миристиновая (С 14:0)	0-0,2	0-0,2	0-0,2	0-0,1	0-1,0
Пальмитиновая (С 16:0)	1,5-6,0	2,5-7,0	5,0-7,6	2,6-5,0	4,0-5,5
Пальмитолеиновая (С 16:1)	0-3,0	0-0,6	0-0,3	0-0,1	0-0,05
Маргариновая (С 17:0)	0-0,1	0-0,3	0-0,2	0-0,1	0-0,05
Маргаринолеиновая (С 17:1)	0-0,1	0-0,3	0-0,1	0-0,1	0-0,06
Стеариновая (С 18:0)	0,5-3,1	0,8-3,0	2,7-6,5	2,9-6,2	2,1-5,0
Олеиновая (С 18:1)	8,0-60,0	51,0-70,0	14,0-39,4	75,0-90,7	43,1-71,8
Линолевая (С 18:2)	11,0-23,0	15,0-30,0	48,3-74,0	2,1-17,0	18,7-45,3
Линоленовая (С 18:3)	5,0-13,0	5,0-14,0	0-0,3	0-0,3	0-0,5
Арахидовая (С 20:0)	0-3,0	0,2-1,2	0,1-0,5	0,2-0,5	0,2-0,4
Гадолеиновая (С 20:1)	3,0-15,0	0,1-4,3	0-0,3	0,1-0,5	0,2-0,3
Эйкозодиеновая (С 20:2)	0-1,0	0-0,1	0	0	0
Бегеновая (С 22:0)	0-2,0	0-0,6	0,3-1,5	0,5-1,6	0,6-1,1
Эруковая (С 22:1)	2,0-60,0	0-2,0	0-0,3	0-0,3	0
Докозодиеновая (С 22:2)	0-2,0	0-0,1	0-0,3	0	0-0,09
Лигноцериновая (С 24:0)	0-2,0	0-0,3	0-0,5	0-0,5	0,3-0,4
Нервоновая (С 24:1)	0-3,0	0-0,4	0	0	0

Рис. 2. Зависимость количества испарившегося топлива Q от температуры t разгонки различных топлив:

1 — бензин АИ-93; 2 — ДТ широкого фракционного состава ШФС-1; 3 — ДТ марки «Л»; 4 — смесь 90 % топлива марки «Л» с 10 % РМ; 5 — смесь 80 % топлива марки «Л» с 20 % РМ; 6 — смесь 50 % топлива марки «Л» и 50 % РМ; 7 — РМ



Состав нефтяных ДТ и растительных масел не может быть выражен простыми химическими формулами. Содержание в них отдельных элементов определяется химическим анализом и обычно дается в массовых долях (табл. 2) [2, 7]. При этом основными элементами являются углерод С, водород Н, кислород О. Содержание кислорода в нефтяных топливах обычно мало и им пренебрегают. В молекулах биотоплив на основе растительных масел содержится значительное число атомов кислорода (около 10 %), что благоприятно влияет на экологические показатели дизелей, работающих на этих топливах. При этом несколько снижается их теплотворная способность. Преимуществом этих топлив является и практическое отсутствие в них серы S (в нефтяных ДТ содержание серы достигает 0,2 % по массе). По данным, приведенным в работе [7], усредненная условная формула элементарного состава ДТ марки «Л» по ГОСТ 305–82 с молярной массой 223,30 кг/кмоль имеет вид $C_{16,2}H_{28,5}$, молярная масса низкоэроукового РМ равна 883,04 кг/моль, его приближенная суммарная формула $C_{57,0}H_{101,6}O_6$.

Таблица 2

Элементарный состав ДТ и растительных масел

Элементарный состав	ДТ	РМ	ПМ
Углерод С	0,867	0,779	0,776
Водород Н	0,133	0,118	0,115
Кислород О	0	0,103	0,109

Примечание. Указаны массовые доли углерода, водорода и кислорода в молекулах топлив.

Рассмотренные особенности жирнокислотного, фракционного и элементарного составов растительных масел определяют их физико-химические свойства. Отличия этих свойств от аналогичных свойств нефтяного ДТ сдерживают широкое применение этих биотоплив в дизелях. Одними из наиболее значимых являются отличия воспламеняемости различных топлив в условиях камеры сгорания (КС) дизеля.

Воспламеняемость растительных масел в камере сгорания дизеля. Важнейшее свойство биотоплив — их воспламеняемость в условиях КС дизеля. Для оценки самовоспламеняемости топлив в КС дизелей и динамики последующего процесса их сгорания применяют различные показатели: цетановое число (ЦЧ);

продолжительность периода задержки воспламенения (ПЗВ) τ_i ; максимальное давление сгорания p_z ; максимальная $(dp/d\varphi)_{\max}$ и средняя $(dp/d\varphi)_{\text{cp}}$ скорости нарастания давления при сгорании (φ — угол поворота коленчатого вала); степень повышения давления при сгорании $\lambda = p_z/p_c$ (p_c — давление конца сжатия); фактор динамичности цикла $\sigma_d = q_{\tau i}/q_{\text{ц}}$ ($q_{\text{ц}}$ — цикловая подача топлива; $q_{\tau i}$ — количество топлива, поступающего в КС за ПЗВ) [8]. Из этих показателей важнейший — период задержки воспламенения τ_i , определяющий остальные показатели динамики сгорания. Это обусловлено тем, что с увеличением периода τ_i к моменту начала самовоспламенения количество поданного и подготовленного к сгоранию топлива оказывается чрезмерно большим и его сгорание происходит с большой скоростью нарастания давления p — максимальной $(dp/dt)_{\max}$ (или оцениваемой по углу поворота коленчатого вала $(dp/d\varphi)_{\max}$) и средней $(dp/dt)_{\text{cp}}$. Количество топлива, поданного за ПЗВ (объемное $q_{\tau i}$ или массовое $g_{\tau i}$), может колебаться в широких пределах. Опыты, проведенные на дизеле с пленочным смесеобразованием, работающем на нефтяном ДТ, показали следующее [8]: за периоды $\tau_i = 0,6; 0,48; 0,35$ мс, соответствующие частотам вращения $n = 1200; 2000; 3000$ мин⁻¹, в цилиндр поступало топливо в количестве 40, 48 и 60 % общей цикловой подачи. При этом максимальная скорость нарастания давления газов в цилиндре на этих режимах составляла $(dp/d\varphi)_{\max} = 0,32...0,38$ МПа/град. При объемном смесеобразовании за ПЗВ впрыскивается значительно большее количество топлива (на номинальном режиме при $n = 2100...2600$ мин⁻¹ — около 70...75 %), поэтому скорости нарастания давления достигают 1,0 МПа/град и более.

Следовательно, при оценке воспламеняемости растительных масел в условиях КС дизеля наибольший интерес представляет исследование влияния свойств топлива на ПЗВ τ_i . При исследовании использованы данные работы [9] по тракторному дизелю типа *Perkins AD3.152* без турбонаддува с непосредственным впрыском топлива. Этот дизель мощностью $N_e = 35$ кВт при $n = 2000$ мин⁻¹ (режим с полной нагрузкой — средним эффективным давлением $p_e = 0,84$ МПа) выполнен рядным с числом цилиндров $i_d = 3$, рабочим объемом $iV_h = 2,503$ л и водяным охлаждением. Степень сжатия двигателя $\varepsilon = 17,4$, диаметр цилиндров $D = 91,48$ мм, ход поршня $S = 126,9$ мм. Радиус кривошипа коленчатого вала составлял $R = 63,45$ мм, длина шатуна $L = 250$ мм. Исследуемый дизель не оснащен устройством изменения угла опережения впрыска топлива (УОВТ). При анализе воспламеняемости топлив использованы данные работы [9] о параметрах этого двигателя, работающего на режиме с частотой $n = 2000$ мин⁻¹ на нефтяном ДТ, РМ и ПМ.

Приведенные на рис. 3 (данные взяты из работы [9]) индикаторные диаграммы дизеля типа *Perkins AD3.152*, полученные на режиме с частотой вращения $n = 2000$ мин⁻¹ и полной нагрузкой ($p_e = 0,84$ МПа), свидетельствуют о том, что момент начала подъема иглы форсунки составил $\varphi_{\text{впр}} = 347$ град поворота коленчатого вала (п.к.в.), т. е. УОВТ равен $\theta_{\text{впр}} = 13$ град п.к.в. до верхней мертвой точки (ВМТ) (табл. 3).

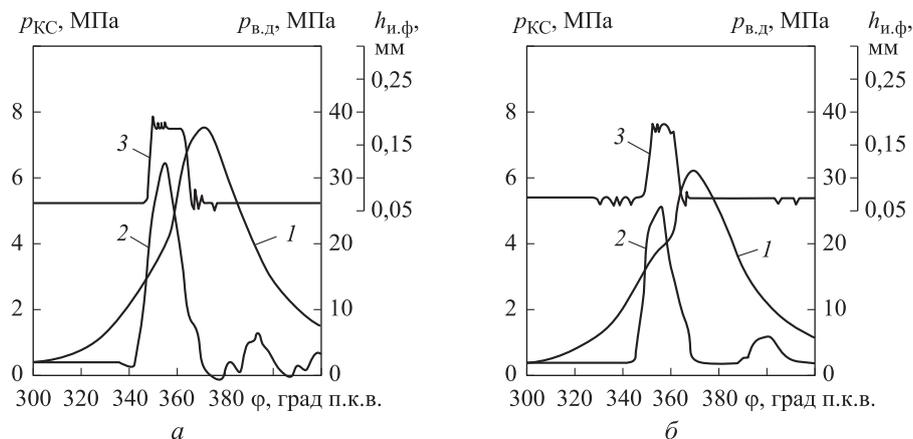


Рис. 3. Индикаторные диаграммы изменения давления в КС $p_{КС}$ (1), давления в линии высокого давления системы топливоподдачи $p_{в.д}$ (в нагнетательном топливопроводе) (2) и положения иглы форсунки $h_{и.ф}$ (3) дизеля типа Perkins AD3.152 на режиме с частотой вращения $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузкой ($p_e = 0,84 \text{ МПа}$) на ДТ (а), РМ (б), ПМ (в)

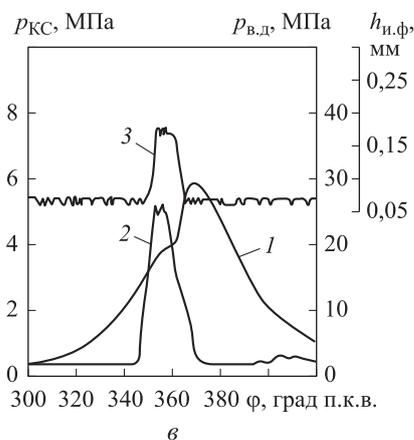


Таблица 3

Параметры рабочего процесса дизеля типа Perkins AD3.152 на режиме с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузкой ($p_e = 0,84 \text{ МПа}$) при моменте начала впрыска $\varphi_{впр} = 347 \text{ град п.к.в.}$, угле опережения впрыска топлива $\theta_{впр} = 13 \text{ град п.к.в. до ВМТ}$

Топливо	Угол начала сгорания $\theta_{сгор}$, град п.к.в. до ВМТ	Момент начала сгорания $\varphi_{сгор}$, град п.к.в.	Задержка воспламенения	
			φ_i , град п.к.в.	τ_i , мс
ДТ	9	351	4	0,33
РМ	7	353	6	0,50
ПМ	7	353	6	0,50

Примечание. Параметры в цилиндре в момент впрыска: $p = 32 \text{ бар}$; $T = 790 \text{ К}$.

В соответствии с данными, приведенными в работе [9], в дизеле типа Perkins AD3.152 на режиме с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузкой ($p_e = 0,84 \text{ МПа}$) угол начала сгорания составил $\theta_{сгор} = 9 \text{ град п.к.в.}$ при работе на нефтяном ДТ и $\theta_{сгор} = 7 \text{ град п.к.в.}$ при работе на РМ и ПМ (рис. 4, см. табл. 3). Тогда момент начала

сгорания ДТ равен $\varphi_{\text{сгор}} = 351$ град п.к.в., а момент начала сгорания исследуемых масел — $\varphi_{\text{сгор}} = 353$ град п.к.в. Эти данные позволяют определить ПЗВ как

$$\varphi_i = \varphi_{\text{сгор}} - \varphi_{\text{впр}} \quad (1)$$

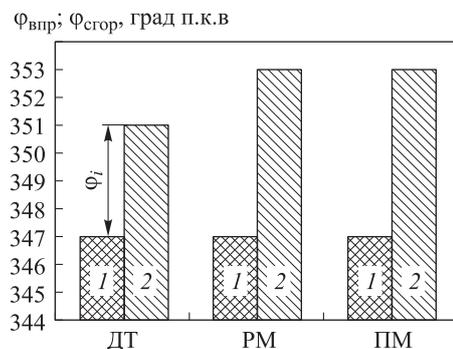


Рис. 4. Момент начала впрыска $\varphi_{\text{впр}}$ (1) и момент начала сгорания $\varphi_{\text{сгор}}$ (2) топлива в двигателе типа *Perkins AD3.152*, работающего на режиме с частотой вращения $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузкой ($p_e = 0,84 \text{ МПа}$) на нефтяном ДТ, РМ и ПМ

С использованием формулы (1) на режиме с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузкой получены следующие значения индикаторного ПЗВ: $\varphi_i = 4$ град п.к.в. для нефтяного ДТ и $\varphi_i = 6$ град п.к.в. для РМ и ПМ (см. табл. 3). Индикаторный ПЗВ в единицах времени определяется в виде $\tau_i = \varphi_i / (6n)$. В соответствии с приведенной формулой на указанном режиме индикаторный ПЗВ равен: $\tau_i = 0,33 \text{ мс}$ для нефтяного ДТ и $\tau_i = 0,50 \text{ мс}$ для исследуемых масел (см. табл. 3).

Параметры воздушного заряда в цилиндре в момент начала впрыска определены следующим образом. Поскольку дизель типа *Perkins AD3.152* является двигателем без наддува, принято, что в начале такта сжатия параметры воздушного заряда примерно соответствуют нормальным атмосферным условиям (давление $p_0 = 1 \text{ бар}$, температура $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, или $T_0 = 293 \text{ К}$). Принимая процесс сжатия адиабатическим (показатель адиабаты $k = 1,4$), можно определить текущее значение температуры в цилиндре с использованием уравнения для адиабатного сжатия

$$T_i = T_0 \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{(k-1)/k}, \quad (2)$$

где T_i , p_i — текущие значения температуры и давления в цилиндре на такте сжатия. Давление p_{347} в момент начала впрыска $\varphi_{\text{впр}} = 347$ град п.к.в. определено с использованием индикаторных диаграмм (см. рис. 4) и оказалось равным 32 бара. Тогда в соответствии с уравнением (2) получено следующее значение температуры T_{347} в момент начала впрыска: $T_{347} = 293 \cdot 32^{0,286} = 790 \text{ К}$. Результаты расчетов по приведенным формулам (см. табл. 3) использованы для определения формул для ПЗВ нефтяного ДТ, РМ и ПМ в дизеле типа *Perkins AD3.152*.

Известные из литературных источников формулы для определения ПЗВ можно условно подразделить на две группы [10]. К первой относятся формулы, основанные на фундаментальных теориях цепных реакций, в частности на

уравнении Н.Н. Семенова, связывающего ПЗВ τ_i с давлением p , температурой T и энергией активации E :

$$\tau_i = Cp^{-n}e^{E/(RT)}, \quad (3)$$

где C , n — константы; R — универсальная газовая постоянная. В некоторых формулах в отличие от формулы (3) вводятся дополнительные коэффициенты, учитывающие специфику рабочего цикла дизеля, как, например, в формуле Hiroyasu и др. [10]. Однако они тоже являются вариациями формулы (3) и обычно содержат экспоненциальную функцию. Вторая группа эмпирических формул отличается от (3) не только по структуре (отсутствием экспоненциальной функции) и наличием других специфических параметров, кроме давления p и температуры T , но и в некоторых случаях даже отсутствием величин p и T . К этой группе можно отнести формулы, полученные Н.Н. Oberg, В.С. Семеновым, N.A. Henein и J. Bolt, а также самую распространенную в русскоязычной литературе формулу А.И. Толстова [10].

Для форсированного дизеля, работающего на нефтяном ДТ, в работе [10] получена следующая формула для определения ПЗВ:

$$\tau_i = 0,55 p^{-1,3} e^{4400/T}, \quad (4)$$

где p , T — давление и температура в цилиндре в момент начала впрыска. При модифицировании формулы (4) применительно к дизелю типа *Perkins AD3.152* получена формула для расчета ПЗВ дизельного топлива:

$$\tau_i = 0,114 p^{-1,3} e^{4400/T}. \quad (5)$$

Проверка формулы (5) применительно к случаю использования ДТ показывает соответствие полученного результата данным, приведенным в табл. 3, по режиму с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузкой ($p_e = 0,84 \text{ МПа}$):

$$\tau_i = 0,114 \cdot 32^{-1,3} e^{4400/790} = 0,114 \cdot 0,01105 \cdot 262,33 = 0,33 \text{ мс.}$$

Для случая использования в качестве топлива растительных масел формула (5) неприменима, поскольку у масел порядок реакции и энергия активации будут другими (вследствие большей энергии активации растительных масел они входят в реакцию сгорания позднее). Анализ данных, представленных в работе [9], позволил формулу для расчета ПЗВ растительных масел в дизеле типа *Perkins AD3.152* представить в виде

$$\tau_i = 0,0735 p^{-1,2} e^{4800/T}. \quad (6)$$

При этом принято, что порядок реакции и энергия активации у РМ и ПМ одинаковы. Проверка формулы (6) позволила получить значение ПЗВ для исследуемых растительных масел, согласующееся с данными, приведенными в табл. 3:

$$\tau_i = 0,0735 \cdot 32^{-1,2} e^{4800/790} = 0,0735 \cdot 0,015625 \cdot 435,26 = 0,50 \text{ мс.}$$

Формулы (5) и (6) позволяют определить ПЗВ в дизеле типа *Perkins AD3.152* на режиме с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузкой ($p_e = 0,84 \text{ МПа}$), работающем на нефтяном ДТ и растительных маслах. Аналогичные исследования ПЗВ этих

топлив проведены и для других нагрузочных режимов, в частности для режима с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и неполной нагрузкой (средним эффективным давлением $p_e = 0,68 \text{ МПа}$). При этом принято, что УОВТ является неизменным для всех нагрузочных режимов и при использовании различных топлив. Результаты расчетов показали, что на режиме с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,68 \text{ МПа}$ ПЗВ равен: $\tau_i = 0,50 \text{ мс}$ для нефтяного ДТ и $\tau_i = 0,63 \text{ мс}$ для РМ и ПМ (рис. 5, а).

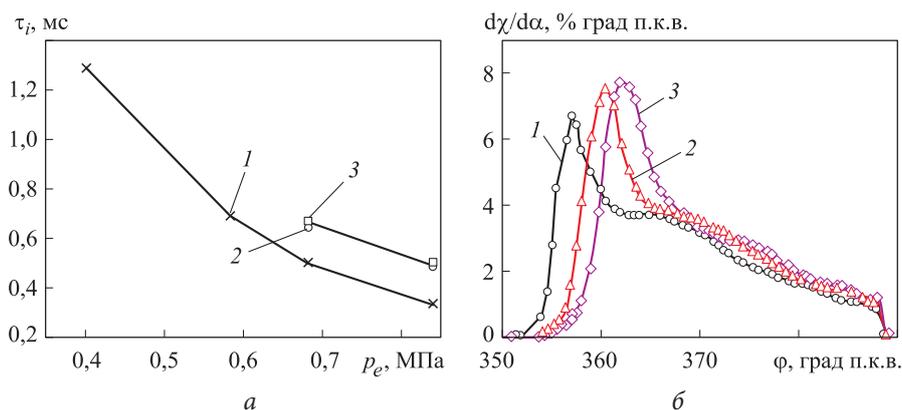


Рис. 5. Зависимость ПЗВ от среднего эффективного давления (а) и скорость выгорания топлива $d\chi/d\alpha$ (б) для дизеля типа *Perkins AD3.152*, работающего на режимах с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и при различных нагрузках (а) и неполной нагрузке ($p_e = 0,68 \text{ МПа}$) (б) на нефтяном ДТ (1), РМ (2) и ПМ (3) (точками обозначены экспериментальные значения)

Особый интерес представляет сравнительная оценка не только показателей динамики процесса сгорания нефтяного ДТ и растительных масел, но и оценка показателей топливной экономичности дизеля при его работе на этих топливах. Такая оценка проведена применительно к режиму с частотой вращения $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и неполной нагрузкой — средним эффективным давлением $p_e = 0,68 \text{ МПа}$. Характеристики скорости выгорания исследуемых топлив приведены на рис. 5, б, а некоторые параметры дизеля на этом режиме, а также свойства РМ и ПМ — в табл. 4 и на рис. 6 [9, 11].

Таблица 4

Параметры исследуемых топлив и рабочего процесса дизеля типа *Perkins AD3.152* на режиме с $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и неполной нагрузкой ($p_e = 0,59 \dots 0,68 \text{ МПа}$)

Топливо	Низшая теплота сгорания H_u , МДж/кг	ЦЧ	ПЗВ τ_i , мс	Среднее индикаторное давление p_i , МПа	Индикаторная мощность N_i , кВт	Индикаторный КПД η_i , %	Среднее эффективное давление p_e , МПа	Эффективная мощность N_e , кВт	Эффективный КПД η_e , %	Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)
ДТ	42,5	45	0,50	0,89	37,1	47,3	0,68	28,4	36,1	234,6
РМ	37,3	36	0,63	0,80	33,4	42,5	0,61	25,4	32,5	297,0
ПМ	37,1	33	0,63	0,78	32,5	41,5	0,59	24,6	31,7	306,1

Данные, приведенные в табл. 4 и на рис. 6, показывают, что худшая по сравнению с нефтяным ДТ воспламеняемость растительных масел сопровождается снижением эффективности их сгорания. В частности, на исследуемом режиме при переводе дизеля типа *Perkins AD3.152* с нефтяного ДТ на РМ или ПМ наряду с увеличением ПЗВ наблюдается снижение эффективного КПД на 4...5 %. Эффективным путем повышения качества процесса сгорания этих биотоплив, обеспечивающим одновременное улучшение показателей их воспламеняемости и топливной экономичности, является переход с нефтяного ДТ на его смеси с растительными маслами.

Следует отметить (см. рис. 6, табл. 4), что добавка 8...10 % (об.) растительных масел, приводящая к снижению ЦЧ исходного нефтяного ДТ примерно на единицу (с 45 до 44 единиц), сопровождается увеличением ПЗВ всего на 0,010...0,012 мс и снижением эффективного КПД дизеля с 36,1 % до 35,6...35,7 %. Однако при таких практически неизменных показателях динамики процесса сгорания и топливной экономичности эта небольшая добавка растительных масел в нефтяное ДТ (до 10 %) приводит к снижению дымности ОГ (выбросов сажи) на 13...17 % и уменьшению эмиссии оксидов азота на 2...3 %.

Проведенные исследования подтверждают возможность и эффективность использования растительных масел в качестве добавок к нефтяному ДТ. В связи с этим в РФ и за рубежом продолжаются исследования характеристик дизелей, работающих на указанных топливах [11–14].

Заключение. Проведенные исследования позволяют сделать вывод об эффективности применения смесей нефтяного ДТ с растительными маслами в 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 с фритюрными маслами. Проведенные исследования воспламеняемости растительных масел в КС дизеля показали, что их худшая воспламеняемость не является препятствием для их использования в качестве моторных топлив. Воспламеняемость смесевых дизельных биотоплив с небольшими добавками растительных масел (до 10 %) практически не отличается от воспламеняемости нефтяных ДТ. При этом использование этих топлив снижает дымность ОГ на 13...17 % и уменьшает эмиссию оксидов азота на 2...3 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.А., Архаров И.А. Моторные топлива. Современные аспекты безопасного хранения и реализации в городах-мегаполисах. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 352 с.

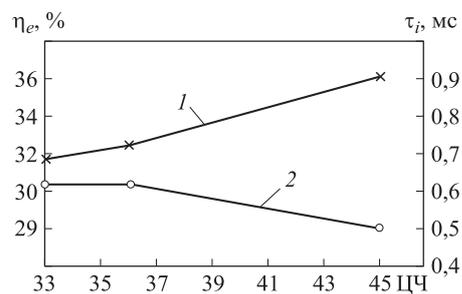


Рис. 6. Зависимость эффективного КПД η_e (1) и ПЗВ τ_i (2) дизеля типа *Perkins AD3.152*, работающего на режиме с частотой вращения $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и неполной нагрузкой, от ЦЧ применяемого топлива

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. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск: Восточноукраинский нац. ун-т им. В. Даля, 2009. 240 с.
4. Паронян В.Х. Технология жиров и жирозаменителей. М.: ДеЛи принт, 2006. 760 с.
5. Еришов Ю.А., Зайцев Н.И. Основы биохимии для инженеров. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 359 с.
6. Марков В.А., Нагорнов С.А., Девянин С.Н. Состав и теплота сгорания биотоплив, получаемых из растительных масел // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. № 2. С. 65–80.
7. 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.
8. Марков В.А., Козлов С.И. Топлива и топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 296 с.
9. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
10. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 589 с.
11. Lotko W., Longwic R., Swat M. The effect of rape oil — diesel oil mixture composition on particulate matter emission level in diesel engine // SAE Technical Paper Series. 2001. Art. 2001-01-3388. DOI: 10.4271/2001-01-3388
12. Hashimoto M., Dan T., Asano I., Arakawa T. Combustion of the rape-seed oil in a diesel engine // SAE Technical Paper Series. 2002. Art. 2002-01-0867. DOI: 10.4271/2002-01-0867
13. Karaosmanoglu F., Kurt G., Ozaktas T. Direct use of sunflower oil as a compression-ignition engine fuel // Energy Sources. 2000. Vol. 22. No. 7. P. 659–672. DOI: 10.1080/00908310050045618
14. Марков В.А., Коришунов Д.А., Девянин С.Н., Дробышев О.В. Улучшение качества процесса смесеобразования дизеля при его работе на рапсовом масле // Безопасность в техносфере. 2007. № 5. С. 26–29.

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 TENFLECS (Российская Федерация, 142191, Москва, Троицк).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марков В.А., Чайнов Н.Д., Лобода С.С. Физико-химические свойства смесевых дизельных биотоплив с добавками растительных масел и их воспламеняемость // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. № 4. С. 115–128.
DOI: 10.18698/1812-3368-2018-4-115-128

PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF MIXTURE DIESEL BIOFUELS WITH VEGETABLE OIL ADDITIVES AND THEIR FLAMMABILITY

V.A. Markov¹
N.D. Chainov¹
S.S. Loboda²

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

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² TENFLECS, Troitsk, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article focuses on types of biofuels and ways of using them in internal combustion engines. The study shows that for diesel engines the most promising is the use of biofuels obtained from vegetable oils. In agriculture, the use of mixture diesel biofuels is economically feasible. The analysis of physicochemical properties of vegetable oils and their mixtures with diesel fuel is carried out. The flammability of petroleum diesel fuel, rapeseed oil and sunflower oil in the combustion chamber of a diesel engine is studied. Findings of the research show that the flammability of mixture diesel biofuels with small additives of vegetable oils (up to 10 %) practically does not differ from the flammability of petroleum diesel fuels. However, the use of these fuels leads to a reduction in the smokiness of the exhaust gases by 13...17 % and a decrease in the emission of nitrogen oxides by 2...3 %

Keywords

Internal combustion engine, diesel engine, petroleum diesel fuel, vegetable oil, rapeseed oil, sunflower oil, mixture biofuel, flammability

Received 11.12.2017
© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A. Motornye topliva. Sovremennyye aspekty bezopasnogo khraneniya i realizatsii v gorodakh-megapolisakh [Engine fuels. Modern aspects of safe storage and sales in metropolitan cities]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 352 p.
- [2] Markov V.A., Devyanin S.N., Zykov S.A., Gaydar S.M. Biotopliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Biofuel for combustion engines]. Moscow, NITs "Inzhener" Publ., 2016. 292 p.
- [3] Vasil'yev I.P. Vliyaniye topliv rastitel'nogo proiskhozhdeniya na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelya. Lugansk, Vostochnoukrainskiy natsionalny universitet im. V. Dal'ya Publ., 2009. 240 p.
- [4] Paronyan V.Kh. Tekhnologiya zhirov i zhirozameniteley [Technology of fats and fat substitutes]. Moscow, DeLi print Publ., 2006. 760 p.
- [5] Ershov Yu.A., Zaytsev N.I. Osnovy biokhimiya dlya inzhenerov [Biochemistry fundamentals for engineers]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 359 p.
- [6] Markov V.A., Nagornov S.A., Devyanin S.N. Composition and heat of combustion of biofuels produced from vegetable oils. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2012, no. 2, pp. 65–80 (in Russ.).
- [7] Markov V.A., Devyanin S.N., Semenov V.G., Shakhov A.V., Bagrov V.V. Ispol'zovaniye rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigatelyakh [Using vegetable oil and fuel based on it in diesel engines]. Moscow, NITs "Inzhener" Publ., 2011. 536 p.

- [8] Markov V.A., Kozlov S.I. Topлива i toplivopodacha mnogotoplivnykh i gazodizel'nykh dvigateley [Fuels and fuel supply in multifuel and gas-diesel engines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 296 p.
- [9] L'otko V., Lukanin V.N., Khachiyan A.S. Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [Using alternative fuels in combustion engine]. Moscow, MADI (TU) Publ., 2000. 311 p.
- [10] Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of piston engines. Special chapters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016. 589 p.
- [11] Lotko W., Longwic R., Swat M. The effect of rape oil — diesel oil mixture composition on particulate matter emission level in diesel engine. *SAE Technical Paper*, 2001, art. 2001-01-3388. DOI: 10.4271/2001-01-3388
- [12] Hashimoto M., Dan T., Asano I., Arakawa T. Combustion of the rape-seed oil in a diesel engine. *SAE Technical Paper*, 2002, art. 2002-01-0867. DOI: 10.4271/2002-01-0867
- [13] Karaosmanoglu F., Kurt G., Ozaktas T. Direct use of sunflower oil as a compression-ignition engine fuel. *Energy Sources*, 2000, vol. 22, no. 7, pp. 659–672. DOI: 10.1080/00908310050045618
- [14] Markov V.A., Korshunov D.A., Devyanin S.N., Drobyshev O.V. Improving quality of diesel mixture formation while working on rape oil. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2007, no. 5, pp. 26–29 (in Russ.).

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

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

Loboda S.S. — industrial engineer, TENFLECS (Troitsk, Moscow, 142191 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Markov V.A., Chainov N.D., Loboda S.S. Physicochemical Properties of Mixture Diesel Biofuels with Vegetable Oil Additives and their Flammability. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 4, pp. 115–128 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2018-4-115-128

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 31.07.2018
Формат 70 × 108/16
Усл.-печ. л. 11,20

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