

УДК 621.436

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**П.Р. Вальехо Мальдонадо¹, С.Н. Девянин², В.А. Марков³,
В.В. Бирюков³**

¹МГМУ “МАМИ”, Москва, Российская Федерация

²МГАУ им. В.П. Горячкина, Москва, Российская Федерация

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: markov@power.bmstu.ru

Показана необходимость использования в дизельных двигателях альтернативных топлив, производимых из возобновляемых сырьевых ресурсов. К этим топливам отнесены растительные масла и этанол, получаемые из растительного сырья. Рассмотрена динамика производства и потребления этих топлив в странах ЕС и перспективы их дальнейшего использования. Приведены способы использования растительных масел в качестве моторных топлив. Проведен анализ физико-химических свойств биотоплив и проблем, возникающих при работе дизельных двигателей на этих топливах. Показана необходимость проведения дальнейших исследований показателей дизельных двигателей, работающих на смесевых биотопливах. Описана экспериментальная установка, позволяющая проводить такие исследования. Представлены результаты экспериментальных исследований работы двигателя на нефтяном дизельном топливе и на различных смесевых биотопливах — смесях рапсового масла и этилового эфира. Показано, что применение топлив на основе растительных масел и биоэтанола позволяет не только обеспечить замещение нефтяных моторных топлив альтернативными топливами, производимыми из возобновляемых сырьевых ресурсов, но и значительно улучшить показатели токсичности отработавших газов, в первую очередь их дымности. Эффект по снижению дымности сохраняется при изменении угла опережения впрыскивания и степени сжатия двигателя. Максимальный эффект по снижению дымности достигнут при работе на смеси рапсового масла с 30 % этилового спирта.

Ключевые слова: дизельный двигатель, дизельное топливо, рапсовое масло, этиловый спирт, смесевое биотопливо.

COMPARISON TESTINGS OF ALTERNATE FUELS FOR DIESEL ENGINES

**P.R. Vallejo Maldonado¹, S.N. Devyanin², V.A. Markov³,
V.V. Birukov³**

¹Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), Moscow, Russian Federation

²Goryachkin Moscow State Agro-Engineering University, Moscow, Russian Federation

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: markov@power.bmstu

For diesel engines the necessity of usage of alternative fuels which are made from renewable raw material resources was shown. They include plant oils and ethanol

which are produced from vegetal resources. The dynamics of production and consumption of these fuels in European Union countries and the prospects of their further usage were considered. Methods of usage of plant oils as motor fuels were given. Physicochemical properties of vegetable-based fuels and problems which diesel engines have when they operate on such fuels were analyzed. The necessity of further researches performance of characteristics of diesel engines which run on biofuel mixtures was indicated. An experimental unit which allows performing such researches was described. The results of experimental researches of engine operating using diesel oil and various biofuel mixtures (mixtures of rapeseed oil and diethyl ether) are presented. It was demonstrated that usage of fuels based on vegetal oil and bioethanol not only allows substituting of oil motor fuels by alternative fuels produced from renewable raw material resources, but as well it improves indicators of exhaust toxicity first and foremost, smokiness. For the engine the smokiness reduction effect remains under variation of lead angle for injection and degree of compression. The maximum effect of smokiness reduction was attained when the engine operated on mixtures of rapeseed oil and 30 % ethanol.

Keywords: diesel engine, diesel fuel, rapeseed oil, ethanol, biofuel mixture.

В последние годы в качестве реальной альтернативы нефтяным дизельным топливам рассматриваются различные растительные масла [1]. Их использование позволяет, с одной стороны, стимулировать рост производства растительных масел как сырья для производства биотоплив и обеспечить замещение (частичное или полное) нефтяных моторных топлив, а с другой, — решить ряд экологических проблем, возникающих в крупных мегаполисах и населенных пунктах сельской местности. Схожие с нефтяными моторными топливами энергетические характеристики растительных масел позволяют использовать последние в качестве моторных топлив. При этом рассматривается целый ряд растительных масел: подсолнечное, рапсовое, хлопковое, соевое, льняное, пальмовое, арахисовое и некоторые другие [1].

Мировой рынок растительных масел весьма неоднороден и представлен десятком основных видов растительного сырья. За последние десять лет объем мирового производства растительных масел возрос в 1,5 раза. Сегодня в мире ежегодно производится более 150 млн т масел, из них на мировом рынке реализуется около 62 млн т. Динамичное развитие рынка растительных масел обусловлено не только увеличением спроса на пищевые растительные масла, но и тем обстоятельством, что эта сельскохозяйственная продукция используется в качестве альтернативного источника энергии. На долю основных четырех видов масел — подсолнечного, соевого, рапсового и пальмового — приходится около 90 % всей мировой торговли и примерно 75 % всего объема производства. Лидирует в этой группе пальмовое масло, 80 % которого ежегодно экспортируется. За ним следует подсолнечное масло с экспортом в 35 % всего производства, далее — соевое с 25 %-ной долей экспорта. Объем поставок рапсового масла (РМ) составляет 12 % [2].

Возможны различные способы использования растительных масел в качестве топлива для дизелей — в исходном виде или после специальной химической обработки, а также в смеси с нефтяными топливами

или спиртами. В настоящее время стоимость растительных масел и топлив на их основе соизмерима со стоимостью нефтяных дизельных топлив. Поэтому применение таких топлив в ряде случаев становится экономически выгодным, особенно в тех странах, где растительные масла имеются в избытке. При этом следует отметить, что полное замещение нефтяных дизельных топлив растительными маслами или их производными (метиловыми или этиловыми эфирами растительных масел) в ближайшей перспективе маловероятно. Но необходимо учитывать, что даже при небольшой добавке растительного масла или его метилового эфира (в количестве 5...10% по объему) в нефтяное дизельное топливо существенно улучшаются показатели токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей. В частности, при этом снижаются дымность ОГ (выброс сажи) и выбросы продуктов неполного сгорания топлива (в первую очередь — несгоревших углеводородов) [3]. Таким образом, растительные масла можно рассматривать не только как альтернативное топливо, но и как экологическую добавку к нефтяным моторным топливам.

В качестве экологической добавки к нефтяному дизельному топливу можно рассматривать и другие альтернативные топлива, получаемые из возобновляемых энергоресурсов. Среди этих топлив в первую очередь необходимо выделить биоэтанол, получить который возможно из различного растительного сырья — сахарной свеклы, сахарного тростника, кукурузы, пшеницы, картофеля, сладкого сорго, топинамбура и других сельскохозяйственных культур [4, 5]. Необходимо отметить, что в 2013 г. на долю биодизельного топлива, производимого из растительных масел, приходится около 70% (по объему) всего объема биотоплив, производимых в странах ЕС, а на долю биоэтанола — около 28%. В 2009–2012 гг. биоэтанол импортировался как топливо E90 (смесь 90% бензина и 10% этанола) (рис. 1). Приведенные данные о производстве и потреблении биотоплива в странах ЕС, а также ощутимый дефицит энергоресурсов в Европе и рост цен на нефтепродукты позволяют сделать вывод о перспективности дальнейшего использования биотоплив в двигателях внутреннего сгорания. В первую очередь это относится к дизельным двигателям, менее чувствительным к физико-химическим свойствам применяемых топлив и отличающимся хорошими показателями топливной экономичности и токсичности ОГ.

Необходимо отметить, что использование этанола в качестве основного топлива может вызвать серьезные проблемы в работе дизеля. Это вызвано низкой плотностью и вязкостью этанола (соответственно 790 кг/м^3 и $1,0 \text{ мм}^2/\text{с}$), а также низким цетановым числом, которое не превышает 10 ед., что вызывает проблему с самовоспламенением спирта в камере сгорания дизеля. Однако он может использоваться как биодобавка к нефтяным топливам. Использование

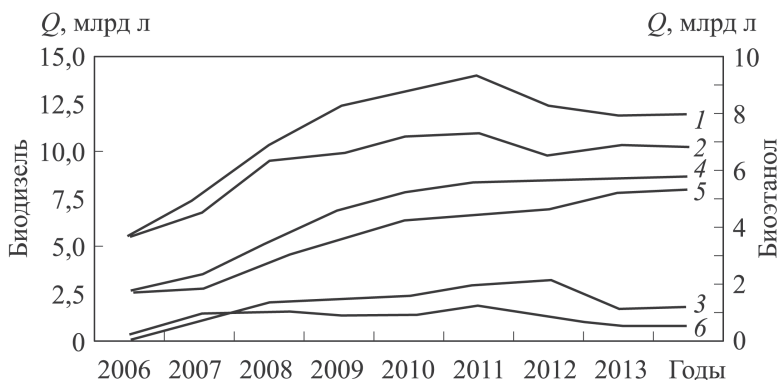


Рис. 1. Динамика производства и потребления биотоплива в странах ЕС:
 1 – потребление биодизельного топлива; 2 и 3 – его производство и импорт; 4 – потребление биоэтанола; 5 и 6 – его производство и импорт

спиртов в качестве биодобавки к нефтяным моторным топливам позволяет решить ряд указанных проблем. Применение таких добавок к дизельному топливу для решения экологических задач еще мало изучено. Представленные в настоящей работе экспериментальные материалы могут представлять интерес с точки зрения решения ряда практических задач.

Следует отметить, что использование растительных масел, их производных, спиртовых топлив осложняется отличиями их физико-химических свойств от свойств нефтяных моторных топлив. В табл. 1 представлен химический состав, низшая теплотворная способность и стехиометрическое соотношение воздух/топливо для указанных топлив [1].

Таблица 1

Химический состав и свойства исследуемых топлив

Топливо	Массовые доли				Низшая теплота сгорания H_U , кДж/кг	Стехиометрическое соотношение l_o , кг/кг	Плотность ρ_t , кг/м ³
	С	Н	О	S			
Дизельное топливо (ДТ)	0,87	0,126	0,004	0,005	42500	14,3	840
Рапсовое масло (РМ)	0,77	0,12	0,11	0	37300	12,5	921
Этиловый спирт (ЭС)	0,521	0,132	0,347	0	27500	9,0	790

В соответствии с предложенной Д.И. Менделеевым зависимостью для нефтяных топлив их низшая теплота сгорания может быть рассчитана по формуле, кДж/кг [4]:

$$H_U = 33,9C + 103H - 10,9(O - S) - 2,514W,$$

где С, Н, О, S, W — массовые доли в топливе углерода, водорода, кислорода, серы и воды.

В смесевых топливах при отсутствии химического взаимодействия между компонентами химический состав смеси полностью определяется химическим составом компонентов. Поэтому для таких смесевых топлив применимо свойство аддитивности его свойств. В связи с этим теплота сгорания смесевого топлива может быть определена по следующей формуле:

$$H_{U_{\text{см}}} = \frac{\sum H_{U_i} m_i}{\sum m_i},$$

где H_{U_i} — низшая теплота сгорания i -го компонента, m_i — его массовая доля. Массовая доля для компонентов может быть определена через их массовое содержание в смеси

$$m_i = \frac{M_i}{M_{\text{см}}},$$

где M_i — масса содержащегося в смеси i -го компонента; $M_{\text{см}}$ — масса смеси.

К указанным смесевым топливам относятся и смеси нефтяного дизельного топлива (ДТ), РМ и этилового спирта. Исследование процесса сгорания таких смесевых топлив проводилось на установке ИДТ-69, созданной в Российском университете дружбы народов (РУДН) и предназначенной для оценки воспламеняемости дизельных топлив методом совпадения вспышек. Установка оснащена устройствами, необходимыми для стабилизации внешних условий. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 2, а ее основные характеристики — в табл. 2.

Установка представляет собой стенд с одноцилиндровым вихрекамерным дизельным отсеком 43 (см. рис. 2), приводимым электродвигателем 48 для поддержания постоянной частоты вращения коленчатого вала и осуществления пуска. Работой установки управляют с пульта 1, имеющего органы управления работой установки и контрольно-измерительные приборы. Для поддержания требуемой температуры воздуха на впуске установка имеет установленный в коллекторе 7 подогреватель 8 входящего в цилиндр воздуха, расход которого контролируется расходомером 6. Температура масла в картере стабилизируется с помощью подогревателя 26, а температура воды в системе охлаждения — с помощью теплообменника 10, установленного в расширительном баке 11 с проточной водой из водопровода.

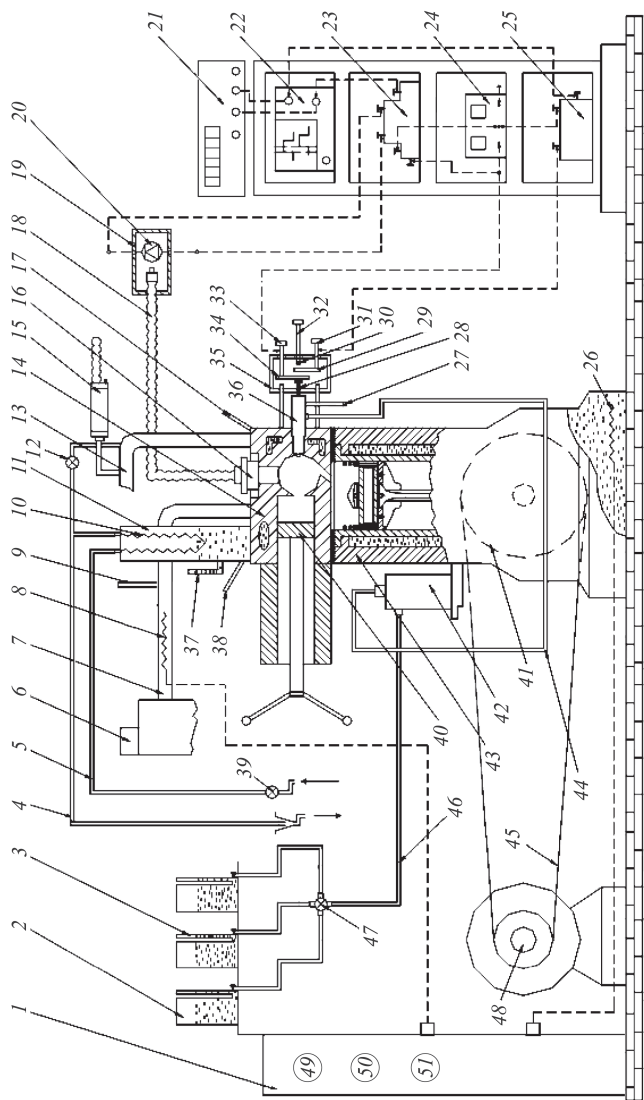


Рис. 2. Схема модернизированной установки ИДТ-69:

1 — пульт управления; 2 — емкости исследуемых топлив; 3 — мензурка; 4 и 5 — слив и подвод охлаждающей воды; 6 — расходомер воздуха; 7 — впускной коллектор; 8 — подогреватель воздуха на впуске; 9, 17, 38 — термометр; 10 — теплообменник; 11 — расширительный бак; 12, 39 — кран воды; 13 — выхлопная труба; 14 — головка отсека; 15 — отборник отработавших газов (дымомер); 16 — оптический приемник; 18 — световод; 19 — фотодагчик; 20 — фотодиод; 21 — частотомер; 22 — осциллограф; 23 — усилитель; 24 — блок питания; 25 — электрический фильтр; 26 — подогреватель масла; 27 — слив топлива форсунки; 28 — изолятор; 29, 34 — контакты движения иглы форсунки; 30, 33 — винт и клемма регулировки зазора между контактами; 31, 32 — клемма, винт; 35 — датчик хода иглы форсунки; 36 — штифтовая форсунка; 37 — мензурка системы охлаждения отсека; 40 — топливопровод высокого давления; 41 — маховик отсека; 42 — топливный насос высокого давления (ТНВД); 43 — одноцилиндровый отсек; 44 — топливопровод системы охлаждения отсека; 45 — ременная передача; 46 — топливопровод низкого давления; 47 — кран переключения исследуемых топлив; 48 — электродвигатель привода отсека; 49 — манометр; 50 — реостат; 51 — термометр

Основные характеристики установки ИДТ-69

Параметры	Единица измерения	Значение
Частота вращения вала	мин ⁻¹	900±10
Диаметр цилиндра	м	0,085
Ход поршня	м	0,115
Степень сжатия		7–23
Расход топлива	кг/ч	0... 1,3
Угол опережения впрыскивания топлива	п.к.в. до ВМТ	0... 30°
Давление впрыскивания топлива	МПа	10,6±0,4
Температура всасываемого воздуха	°С	69±1
Температура жидкости, охлаждающей цилиндр	°С	100±1
Температура жидкости, охлаждающей форсунку	°С	30±1
Температура масла в картере	°С	60±1
Давление масла в магистрали	МПа	0,19±0,02
Зазор между штоками и коромыслами клапанов на холодном двигателе:		
впускной клапан	мм	0,20
выпускной клапан	мм	0,25

Изменение степени сжатия проводится на установке перемещением с помощью винтовой пары регулировочного поршня 40, размещенного в головке 14 отсека. В результате изменяется объем вихревой камеры сгорания цилиндрической формы, имеющей соединительный канал, расположенный тангенциально в вихревой камере и соединяющий ее с полостью над поршнем. В вихревой камере на оси ее цилиндрической части установлена форсунка 36 со штифтовым распылителем, имеющая контактный датчик 35 контроля движения иглы распылителя. Выхлопная система (труба 13) имеет отвод, к которому через штуцер присоединен отборник отработавших газов 15, предназначенный для проведения анализа ОГ по дымности выхлопа.

На описанной установке были исследованы различные топлива, отличающиеся по склонности к сажеобразованию при работе на них дизеля. Испытанию подвергались следующие топлива: ДТ, РМ, смесь (эмульсия) 90 % РМ и 10 % этилового спирта (ЭС), смесь (эмульсия) 70 % РМ и 30 % ЭС. Исследование топлив, содержащих РМ и ЭС, потребовало создания специального смесителя для получения устойчивых смесей. Использование смесителя позволяло в процессе эксперимента получать смеси (эмульсии) без добавления эмульгатора. Основные физико-химические свойства исследованных топлив приведены в табл. 3.

Основные физико-химические свойства исследованных топлив

Топливо	Плотность ρ_T , кг/м ³	Низшая теплота сгорания H_U , кДж/кг	Количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива, l_o кг/кг
ДТ	840	42500	14,3
РМ	921	37300	12,5
90 % РМ+10 % ЭС	902	36360	11,8
70 % РМ+30 % ЭС	890	34397	11,3

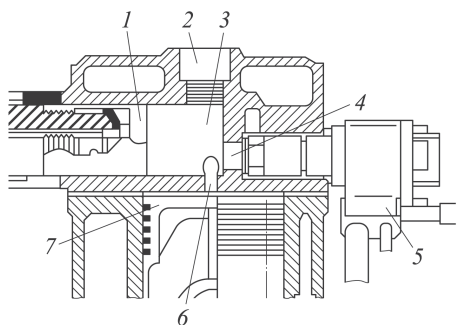


Рис. 3. Схема камеры сгорания установки ИТД-69:

1 – регулировочный поршень; 2 – датчик воспламенения; 3 – вихревая камера; 4 – штифтовой распылитель; 5 – форсунка; 6 – тангенциальный канал; 7 – поршень

следуемого топлива; ρ_T – его плотность, кг/м³; n – частота вращения вала установки, мин⁻¹.

На установке ИТД-69 использована камера сгорания разделенного типа, схема которой приведена на рис. 3. В процессе сжатия поршень 7 вытесняет воздух из надпоршневого пространства через соединительный канал 6 в вихревую камеру 3. Тангенциальное расположение канала 6 в вихревой камере 3 обеспечивает закручивание воздушно-го заряда в этой камере при его втекании. Топливо через штифтовой распылитель 4 форсунки 5 подается во вращающийся воздушно-го заряд камеры сгорания 3. Объем вихревой камеры 3 может изменяться регулировочным поршнем 1, что приводит к изменению степени сжатия.

Характеристики топливовоздушных смесей для исследованных топлив приведены в табл. 4. Там же представлены значения количества теплоты $Q_{ц}$, подаваемой в цилиндр установки с топливовоздушной смесью за цикл.

Количество топлива, подаваемого в камеру сгорания установки ИТД-69, определялось для каждого топлива индивидуально из условия сохранения постоянства состава смеси (коэффициент избытка воздуха поддерживался на уровне $\alpha \approx 2,25$). Для обеспечения этого условия цикловая подача топлива задавалась равной [мм³/цикл]:

$$V_{ц} = \frac{G_{в}}{3 \cdot 10^{-8} \alpha l_o \rho_T n},$$

где $G_{в}$ – часовой расход воздуха, кг/ч; α – требуемый коэффициент избытка воздуха; l_o – стехиометрический коэффициент для исследуемого топлива;

ρ_T – его плотность, кг/м³; n – частота вращения вала установки, мин⁻¹.

Характеристики исследуемых топливовоздушных смесей

Топливо	Расход воздуха G_B , кг/ч	Количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива l_o , кг/кг	Цикловая подача топлива $V_{ц}$, мм ³ /цикл	Коэффициент избытка воздуха α	Количество теплоты, подаваемой в цилиндр с топливовоздушной смесью за цикл $Q_{ц}$, Дж
ДТ	15,84	14,3	22,5	2,17	799,6
РМ		12,5	23,2	2,19	797,5
90 % РМ+ +10% ЭС		11,8	24,2	2,28	790,7
70 % РМ+ +30% ЭС		11,3	25,9	2,25	790,8

Для измерения содержания сажи в ОГ использовался дымомер фирмы Bosch типа *EFAW-65*. Принцип его работы заключается в фильтрации ОГ через специальный бумажный фильтр. Зонд для отбора ОГ в дымомерное устройство 15 (см. рис. 2) представляет собой Г-образную трубку, изготовленную из коррозионно-стойкой стали. Входное отверстие зонда расположено по оси впускной трубы и направлено навстречу потоку ОГ. Измерительная аппаратура включала фотоэлектрический преобразователь и вторичный показывающий прибор, снабженный потенциометром нулевого выравнивания и микроамперметром, имеющим шкалу с градуировкой от 0 до 10 единиц по шкале Bosch. Дымность определялась по уровню отраженного от использованного бумажного фильтра потока света, регистрируемого цифровым прибором непосредственно в единицах Bosch.

Испытания проводились в два этапа. На первом этапе исследовались топлива № 1, 2 и 3 (см. табл. 4) при степени сжатия $\varepsilon = 18$ и различных углах опережения впрыскивания θ . На втором этапе — исследовались топлива № 1, 2, 3 и 4 (см. табл. 4) при угле опережения впрыскивания $\theta = 13$ град. п.к.в. до ВМТ и различных степенях сжатия ε . Остальные параметры испытаний описаны ранее.

Результаты первого этапа испытаний приведены на рис. 4. Как следует из представленных результатов, использование РМ или смеси РМ с 10 % этанола приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на ДТ. Причем, во всем исследованном диапазоне изменения угла опережения впрыскивания (θ от 10 до 26 град. п.к.в. до ВМТ) переход с ДТ на РМ приводит к снижению дымности на 0,2...0,8 единиц по шкале Bosch (на 3...19%), а добавка к РМ 10% этанола дополнительно снижает дымность еще на 0,3...0,7 единиц по шкале Bosch (еще на 7...8%). Максимальное снижение дымности ОГ достигнуто при работе с $\theta = 13$ град. п.к.в. до ВМТ на рапсовом масле с 10% этанола и составило 1,6 единиц по шкале Bosch или 24%.

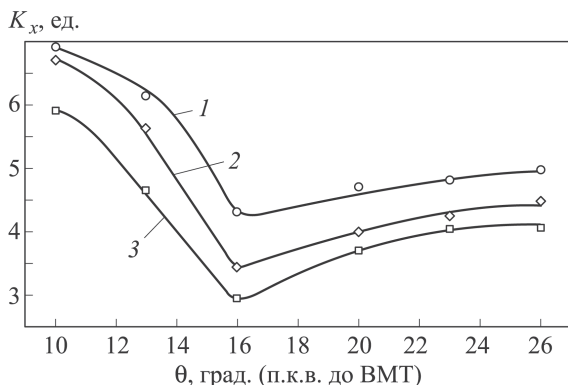


Рис. 4. Зависимость дымности ОГ K_x от УОВТ θ при степени сжатия $\epsilon = 18$ для различных топлив:

1 – ДТ; 2 – РМ; 3 – 90 % РМ + 10 % ЭС

Увеличение дымности ОГ при уменьшении угла опережения впрыскивания меньше 16 град. п.к.в. до ВМТ, вероятно, связано со снижением количества топлива, поданного за период задержки воспламенения, и увеличением доли топлива, сгорающего в диффузионной фазе горения, когда неиспарившееся топливо выбрасывается из вихревой камеры в основную и при плохом смесеобразовании превращается в сажу.

По представленным на рис. 4 характеристикам дымности ОГ следует отметить излом этих характеристик при угле опережения впрыскивания $\theta = 16$ град. п.к.в. до ВМТ. Увеличение дымности при углах более 16 град. п.к.в. до ВМТ может быть объяснено затягиванием периода задержки воспламенения при раннем впрыскивании, удлинением струй распыливаемого топлива за этот период и увеличением количества топлива, попадающего на относительно холодные стенки камеры сгорания. Как результат этих процессов – плохое перемешивание топлива с воздухом, затягивание его догорания и увеличение дымности ОГ. По мере роста угла опережения впрыскивания более 16 град. п.к.в. до ВМТ (при еще более раннем впрыскивании) количество топлива, попадающего на стенки камеры сгорания, возрастает, что и вызывает рост дымности ОГ.

Результаты второго этапа испытаний представлены на рис. 5, на котором видно, что использование РМ или смеси РМ с 10 и 30 % этанола приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на дизельном топливе. Причем, во всем исследованном диапазоне изменения степени сжатия (ϵ от 18 до 22) работа на РМ приводит к снижению дымности на 0,6... 1,3 ед. по шкале Bosch, добавка к РМ 10 % этанола дополнительно снижает дымность еще на 0,5... 0,7 ед., а добавка к РМ 30 % этанола снижает дымность еще на 0,7... 1,1 ед. по шкале Bosch.

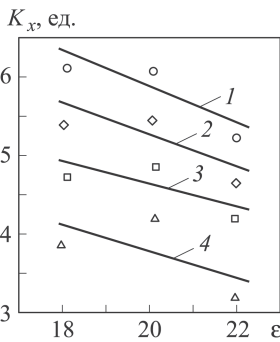


Рис. 5. Зависимость дымности ОГ K_x от степени сжатия ε при УОВТ $\theta = 13$ град. п.к.в. до ВМТ для различных топлив: 1 – ДТ; 2 – РМ; 3 – 90 % РМ + 10 % ЭС; 4 – 70 % РМ + 30 % ЭС

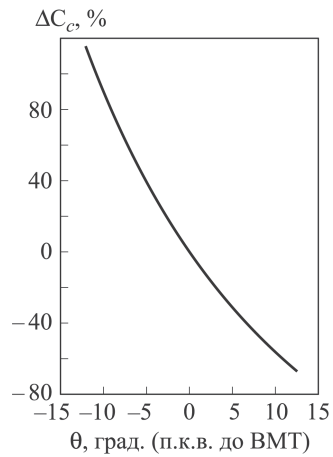


Рис. 6. Обобщенная зависимость концентрации в ОГ дизелей сажи C_c от УОВТ θ при работе на номинальном режиме ($\theta_{\text{опт}} = 0$ – оптимальный с точки зрения топливной экономичности УОВТ)

По данным, приведенным на рис. 5, следует отметить, что увеличение степени сжатия ε более 18 приводит к улучшению качества смесеобразования как за счет роста температуры воздушного заряда, так и за счет увеличения турбулизации втекающего в камеру сгорания и вытекающего из нее потока рабочей смеси. Кроме того, увеличение степени сжатия приводит к увеличению плотности воздушного заряда в процессе впрыскивания, что снижает дальность топливной струи и вероятность попадания топлива на относительно холодные стенки камеры сгорания. Поэтому для наибольшего снижения дымности ОГ целесообразно использование рассматриваемых смесевых биотоплив в сочетании с увеличением степени сжатия ε .

Результаты проведенных экспериментальных исследований, приведенные на рис. 4 и 5, хорошо согласуются с известными экспериментальными данными работы [6] по дизельным двигателям, работающим на нефтяном дизельном топливе. Так, представленный на рис. 6 график обобщенной зависимости эмиссии сажи (углерода С) от УОВТ для дизелей с неразделенными камерами сгорания, работающих на номинальном режиме, свидетельствует о том, что с уменьшением УОВТ (при более позднем впрыскивании топлива) выброс сажи (дымность ОГ) резко снижается. При этом отклонение УОВТ на 10 град. п.к.в. от его оптимального значения в любом направлении сопровождается изменением дымности ОГ на 50...100 %.

Приведенный на рис. 7 график зависимости эмиссии сажи от степени сжатия ε для дизелей с неразделенными камерами сгорания, работающих на нефтяном дизельном топливе на скоростном режиме с

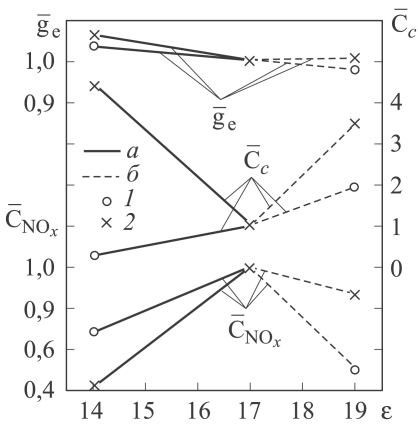


Рис. 7. Обобщенная зависимость относительного содержания сажи C_c в ОГ и удельного эффективного расхода топлива \bar{g}_e от степени сжатия ε для дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива (а) и с предкамерой (б), работающих на режиме с частотой вращения коленчатого вала $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ (1) и 1500 мин^{-1} (2) при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 2,2$

$n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ при полной нагрузке, подтверждает тенденцию увеличения дымности ОГ с уменьшением ε . Так, при снижении ε на 3 единицы (от $\varepsilon = 17$ до $\varepsilon = 14$) дымность ОГ (содержание в ОГ сажи) возрастает в 4,5 раза.

В заключение следует отметить, что применение топлив на основе растительных масел и биоэтанола позволяет не только обеспечить замещение нефтяных моторных топлив альтернативными топливами, производимыми из возобновляемых сырьевых ресурсов, но и значительно улучшить показатели токсичности ОГ, в первую очередь снизить дымность ОГ. При этом можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные на установке ИТД-69 испытания с коэффициентом избытка воздуха 2,2...2,3 показали, что использование альтернативных топлив — рапсового масла или его смеси с этиловым спиртом в количестве 10 и 30% приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на дизельном топливе.

2. При использовании рассматриваемых альтернативных топлив эффект по снижению дымности сохраняется при изменении УОВТ от 10 до 26 град. п.к.в. до ВМТ и изменении степени сжатия от 18 до 22.

3. Добавка этилового спирта к рапсовому маслу позволяет достичь большей эффективности снижения дымности ОГ. При добавлении в РМ 30% спирта удалось достичь снижения дымности ОГ примерно в 2 раза большего, чем при добавлении 10% ЭС.

4. При использовании рассматриваемых альтернативных топлив, степени сжатия $\varepsilon = 18$ и УОВТ $\theta = 13$ град. п.к.в. до ВМТ максимальный эффект по снижению дымности ОГ достигнут при работе на РМ с 10% ЭС и составил 1,6 ед. по шкале *Bosch* или 24% по сравнению с работой на дизельном топливе.

5. При использовании рассматриваемых альтернативных топлив, степени сжатия $\varepsilon = 22$ и УОВТ $\theta = 13$ град. п.к.в. до ВМТ максимальный эффект при снижении дымности ОГ достигнут при работе на смеси РМ с 30% ЭС и составил 2 ед. по шкале *Bosch* или 38% по сравнению с работой на дизельном топливе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях* / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Семенов и др. М.: ООО НИЦ “Инженер” (Союз НИО), ООО “Онико-М”, 2011. 536 с.
2. *Енцова А.* Растительный бизнес // Продвижение продовольствия. 2011. № 3 (<http://www.habeas.ru/prod/2011/03/rastitelnyj-biznes>) (дата обращения: 19.11.2013).
3. *Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И.* Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
4. *Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания* / А.А. Александров, И.А. Архаров, В.А. Марков и др. / под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. М.: ООО НИЦ “Инженер”, ООО “Онико-М”, 2012. 791 с.
5. *Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С.* Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
6. *Машиностроение.* Энциклопедия. Т. IV. Двигатели внутреннего сгорания / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др. / под ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение, 2013. 784 с.

REFERENCES

- [1] Markov V.A., Devyanin S. N., Semenov V. G. Ispol'zovanie rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigatelyakh [The use of vegetable oils and fuels on their base in diesel engines]. Moscow, NITs “Inzhener” Publ., “Oniko-M” Publ., 2011. 536 p.
- [2] Entsova A. Floral business. *Prodvizhenie prodovol'stviya. Prod&Prod* [Food Promotion. Prod&Prod], 2011, no. 3 (in Russ). Available at: <http://www.habeas.ru/prod/2011/03/rastitelnyj-biznes> (accessed 19.11. 2013).
- [3] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [Toxicity of exhaust emissions of diesel engines]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2002. 376 p.
- [4] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Markov V.A., eds. Al'ternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, NITs “Inzhener” Publ., “Oniko-M” Publ., 2012. 791 p.
- [5] L'otko V., Lukanin V.N., Khachiyani A.S. Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatelyah vnutrennego sgoraniya [The use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, MADI (TU) Publ., 2000. 311 p.
- [6] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A., Aleksandrov A.A., Frolov K.V., eds. Mashinostroenie. Entsiklopediya T. IV. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Mechanical Engineering. Encyclopedia. Vol. IV. Internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 784 p.

Статья поступила в редакцию 22.04.2014

Вальехо Мальдонадо Пабло Рамон — канд. техн. наук, доцент кафедры “Автомобильные и тракторные двигатели” МГМУ “МАМИ”. Автор более 50 научных работ в области рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания, использования альтернативных моторных топлив.

МГМУ “МАМИ”, Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38.

Vallejo Maldonado P.R. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Automobile and Tractor Engines” department of the Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI). Author of more than 50 publications in the field of working processes of internal combustion engines, usage of alternative motor fuels.

Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), Bol'shaya Semenovskaya ul., 38, Moscow, Russian Federation.

Девянин Сергей Николаевич — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Тракторы и автомобили” МГАУ им. В.П. Горячкина. Автор более 150 научных работ в области рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания и топливopодачи дизелей. МГАУ им. В.П. Горячкина, Российская Федерация, 127550, Москва, Тимирязевская ул., д. 58

Devyanin S.N. — Dr. Sci. (Eng.), professor, chief of “Tractors and Automobile” department of the Goryachkin Moscow State Agro-Engineering University. Author of more than 150 publications in the field of working processes of internal combustion engines and fuel supply of diesel engines.

Goryachkin Moscow State Agro-Engineering University, Timiryazevskaya ul. 58, Moscow, Russian Federation.

Марков Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области автоматического управления и регулирования двигателей внутреннего сгорания, использования альтернативных моторных топлив.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Markov V.A. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Thermophysics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 300 publications in the field of automatic-control and regulation of internal combustion engine, usage of alternative motor fuels.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Бирюков Владимир Владимирович — аспирант кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области использования альтернативных моторных топлив.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Birukov V.V. — post-graduate of “Thermophysics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of three publications in the field of usage of alternative motor fuels.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.