

Исследование автомобильного дизеля при работе на биокеросине

Д. А. Уханов¹, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник

А. Д. Черепанова¹, кандидат химических наук

А. П. Уханов²✉, доктор технических наук, профессор кафедры «Технический сервис машин»

¹ ГосНИИ химмотологии Минобороны России

121467, г. Москва, ул. Молодогвардейская, д. 10

²ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ

440014, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30

✉dispgau@mail.ru

Резюме. Работа выполнена с целью экспериментального подтверждения возможности практического применения биокеросина в качестве альтернативного дизельного топлива. Для этого были определены основные показатели физико-химических свойств (плотность, вязкость, цетановое число, низшая теплота сгорания, диаметр пятна износа) биокеросина на основе авиационного керосина ТС-1 с добавлением к нему рапсового масла (РМ) и цетаноповышающей присадки (ЦП) и проведены стендовые испытания автомобильного турбонаддувного дизеля Д-245.12С при работе на биокеросине с объемным содержанием в керосине рапсового масла 10, 20, 30, 40 и 50% и 0,3% ЦП этилгексилнитрата, по результатам которых определены показатели процесса сгорания топлива (период задержки воспламенения, максимальное давление цикла, средняя скорость нарастания давления газов, степень повышения давления) и температура отработавших газов в сравнении с работой дизеля на товарном нефтяном топливе ДТ-Л-К5, смешанном топливе 80%ДТ+20%РМ и авиационном керосине ТС-1. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что по показателям физико-химических свойств и показателям процесса сгорания наиболее близким к нефтяному ДТ является биокеросин с содержанием в авиационном керосине 40% рапсового масла и 0,3% присадки этилгексилнитрата.

Ключевые слова: дизельное топливо, авиационный керосин, рапсовое масло, присадка, биокеросин, дизель, показатели рабочего процесса.

Для цитирования: Уханов Д. А., Черепанова А. Д., Уханов А. П. Исследование автомобильного дизеля при работе на биокеросине // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №1 (65). С. 192-202. doi:10.18286/1816-4501-2024-1-192-202

Study of automobile diesel when running on biokerosene

D. A. Ukhanov¹, A. D. Cherepanova¹, A. P. Ukhanov²✉

¹ State Research Institute of Chemmotology of the Russian Ministry of Defense

121467, Moscow, Molodogvardeyskaya st., 10

²FSBEI HE Penza State Agrarian University,

440014, Penza, st. Botanicheskaya, 30

✉dispgau@mail.ru

Abstract. The purpose of the research is to experimentally confirm the possibility of practical usage of biokerosene as an alternative diesel fuel. For this purpose, the main parameters of the physical and chemical properties (density, viscosity, cetane number, lower calorific value, wear scar diameter) of biokerosene based on aviation kerosene TS-1 with the addition of rapeseed oil (RO) and a cetane enhancer (CE) were determined and bench tests of the automobile turbocharged diesel engine D-245.12S were carried out when operating on biokerosene with a volumetric content of rapeseed oil in kerosene of 10, 20, 30, 40 and 50% and 0.3% ethylhexyl nitrate CE; based on the test results, the parameters of fuel combustion process were determined (period of delay ignition, maximum cycle pressure, average rate of gas pressure increase, pressure increase degree) and exhaust gas temperature in comparison with diesel operation on commercial petroleum fuel DT-L-K5, mixed fuel 80% DT + 20% RS and aviation kerosene TS-1.

The results of the studies indicate that in terms of physical and chemical properties and combustion process parameters, the closest to petroleum diesel fuel is biokerosene containing 40% of rapeseed oil and 0.3% ethylhexyl nitrate additive in aviation kerosene.

Keywords: diesel fuel, aviation kerosene, rapeseed oil, additive, biokerosene, diesel, work process parameters.

For citation: Ukhanov D. A., Cherepanova A. D., Ukhanov A. P. Study of automobile diesel when running on biokerosene// Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2024;1(65): 192-202 doi:10.18286/1816-4501-2024-1-192-202

Введение

Альтернативным моторным топливом для дизельных двигателей является дизельное смесевое топливо (ДСТ), получаемое смешиванием нефтяного и растительного компонентов [1-8]. В зависимости от степени переработки растительного компонента различают два вида ДСТ: биодит и биодизель. В качестве компонентов биодита используют товарное нефтяное ДТ и натуральное растительное масло (рапсовое, рыжиковое, редечное, сурепное, соевое, сафлоровое, свербиговое, льняное, горчичное и другие) в различных процентных соотношениях. Компонентами биодизеля являются товарное нефтяное ДТ и спиртовой (метилвый или этиловый) эфир растительного масла в различных процентных соотношениях. При этом в рекомендуемом для практического использования составе ДСТ нефтяное ДТ является его основой, а растительное масло или эфир растительного масла – биодобавкой [9,10]. По основным физико-химическим свойствам (теплотворной способности, воспламеняемости, смазывающей способности и др.) биодит и биодизель близки между собой, но существенно отличаются по плотности и кинематической вязкости [11-14]. При нормируемой температуре плотность и вязкость биодизеля ниже биодита и их значения соответствуют нефтяному ДТ. Это связано с тем, что в качестве растительного компонента биодизеля используется эфир растительного масла, в котором практически нет тяжелых глицериновых фракций. Стоимость биодизеля на 20...25 % выше биодита по причине дополнительных затрат на производство эфира растительного масла. В этой связи в автотракторных дизелях экономически целесообразно использовать биодит.

Сдерживающим фактором массового применения биодита является более высокая зависимость плотности и кинематической вязкости такого смесевое топлива от температурных условий эксплуатации по сравнению с товарным нефтяным ДТ. При нормируемой температуре плотность и кинематическая вязкость биодита являются завышенными по сравнению с товарным ДТ и не отвечают требованиям ГОСТ 305–2013 и ГОСТ 32511–2013 на нефтяное дизельное топливо. Причиной этого является повышенная плотность и кинематическая вязкость биодобавки – растительного компонента биодита. У растительных масел, используемых в качестве биодобавки к нефтяному ДТ, плотность и вязкость находятся соответственно в пределах 900...930 кг/м³ и 51,6...115,5 мм²/с, тогда как нормативные значения этих показателей у стандартного летнего ДТ составляют 820...845 кг/м³ и 2,0...4,5 мм²/с. Повышенная плотность и вязкость моторного топлива приводят к росту цикловой подачи топлива, ухудшению его прокачиваемости по системе топливоподдачи, снижению качества распыливания и дальнотойности топливной струи в камере сгорания дизеля. В конечном итоге все вышеуказанные факторы, связанные с повышенной плотностью и вязкостью биодита,

негативно влияют на мощностные, топливно-экономические и экологические показатели дизельного ДВС [15].

Другим направлением при разработке альтернативного топлива для транспортных дизелей является применение в качестве основы смесевое топливо продуктов переработки из среднедистиллятной фракции нефти, выкипающей при температуре 140...280°С. К такому нефтепродукту прежде всего относится авиационный керосин с низшей теплотой сгорания 42,9...43,4 МДж/кг, смазывающей способностью по диаметру пятна износа 750...800 мкм, плотностью и кинематической вязкостью соответственно 780...810 кг/м³ и 1,05...1,50 мм²/с [16-18]. Поэтому добавление растительного масла к авиационному керосину с указанными показателями физико-химических свойств в определенном количестве позволяет получить смесевое топливо (биокеросин), близкое по своим теплотворным, смазывающим и физическим свойствам к нефтяному ДТ и пригодное для применения в дизелях. Однако недостатком биокеросина с таким компонентным составом, по сравнению с нефтяным ДТ, является пониженное цетановое число по причине низких значений цетановых чисел нефтяного и растительного компонентов: у авиационного керосина цетановое число находится в пределах 38...43 ед., у растительных масел – 32...37 ед., тогда как у нефтяного ДТ оно должно быть не менее 45 ед. по ГОСТ 305–2013 или не менее 51 ед. по ГОСТ 32511–2013. Так как цетановое число характеризует способность топлива к самовоспламенению в камере сгорания дизеля и от его величины зависит период задержки воспламенения, скорость нарастания давления газов в цилиндрах и расход топлива, то для повышения цетанового числа биокеросина предлагается добавить в него цетаноповышающую присадку этилгексилнитрат (ЭГН).

В связи с вышеуказанным целью исследований является экспериментальное подтверждение возможности практического применения биокеросина в качестве альтернативного дизельного топлива.

Материалы и методы

За объект исследований приняты:

- 1) товарное летнее дизельное топливо ДТ-Л-К5 по ГОСТ 32511–2013;
- 2) авиационный керосин ТС-1 по ГОСТ 10227–86;
- 3) биодит 80%ДТ+20%РМ на основе дизельного топлива ДТ-Л-К5 с добавлением расового масла (РМ) в объеме 20 %;
- 4) биокеросин ТС-1+РМ+ЭГН на основе авиационного керосина ТС-1 с добавлением РМ в объеме 10, 20, 30, 40 и 50 % и цетаноповышающей присадки ЭГН в объеме 0,3 % [19].

Перед началом моторных испытаний были проведены лабораторные исследования, по результатам которых определены основные показатели физико-химических свойств исследуемых топлив (см. таблицу).

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

Таблица. Основные показатели физико-химических свойств исследуемых моторных видов топлива

Исследуемое моторное топливо	Плотность при 15 °С, кг/м ³	Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с	Цетановое число	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Смазывающая способность: скорректированный диаметр пятна износа при 60 °С, мкм
Летнее ДТ (нормы по ГОСТ 32511–2013)	820-845	2,0-4,5	не менее 51	не регламентируется	не более 460
Летнее ДТ (нормы по ГОСТ 305–2013)	не более 863,4	3,0-6,0*	не менее 45	не регламентируется	не регламентируется
ДТ-Л-К5	837,3	2,593	56,3	42,96	403
ТС-1	786,5	1,044	40,0	43,44	748
80% ДТ+20%РМ	853,7	4,664	55,0	42,04	164
89,7%ТС-1+10%РМ+ +0,3%ЭГН	801,0	1,423	52,9	42,80	208
79,7%ТС-1+20%РМ+ +0,3%ЭГН	815,1	2,008	52,5	42,22	188
69,7%ТС-1+30%РМ+ +0,3%ЭГН	828,2	2,677	50,5	41,68	186
59,7%ТС-1+40%РМ+ +0,3%ЭГН	841,7	3,720	48,7	41,14	211
49,7%ТС-1+50%РМ+ +0,3%ЭГН	855,3	5,201	46,9	40,62	220

*Кинематическая вязкость при 20 °С, мм²/с

Биодит 80%ДТ+20%РМ с объемным содержанием в товарном нефтяном дизельном топливе ДТ-Л-К5 20% рапсового масла по показателям физических свойств (плотности и кинематической вязкости) не соответствуют требованиям ГОСТ 32511–2013 и ГОСТ 305–2013 на летнее нефтяное ДТ и превышают значения товарного ДТ.

Биокеросин с объемным содержанием в авиационном керосине от 20 % до 40% рапсового масла и 0,3% этилгексилнитрата по показателям физических свойств, воспламеняемости и теплотворной способности сопоставим с товарным летним ДТ и соответствует требованиям ГОСТ 32511–2013 и ГОСТ 305–2013. Так, например, плотность, кинематическая вязкость, цетановое число и низшая теплота сгорания у биокеросина 69,7%ТС-1+30%РМ +0,3%ЭГН составляют соответственно 828,8 кг/м³, 2,677 мм²/с, 50,5 ед. и 41,68 МДж/кг, у товарного нефтяного дизельного топлива ДТ-Л-К5 эти показатели равны 837,3 кг/м³, 2,593 мм²/с, 56,3 ед. и 42,96 МДж/кг.

Кроме того, по требованиям ГОСТ 32511–2013 смазывающая способность моторного топлива считается хорошей, если величина скорректированного диаметра пятна износа при температуре 60 °С не превышает 460 мкм. Диаметр пятна износа у различных образцов биокеросина (с содержанием рапсового масла от 10 % до 50 % и 0,3 % этилгексилнитрата) находится в пределах 188...220 мкм, тогда как у авиационного керосина ТС-1 и дизельного топлива ДТ-Л-К5 этот показатель составляет соответственно 748 мкм и 403 мкм. Поэтому можно предположить,

что лучшая смазочная способность биокеросина будет способствовать снижению износа деталей прецизионных пар топливной аппаратуры при работе дизеля на таком виде смесового топлива.

Результаты

Для подтверждения возможности практического использования биокеросина в качестве альтернативного моторного топлива были проведены стендовые испытания автомобильного дизеля по показателям рабочего процесса. Испытания дизеля при его работе на опытных образцах биокеросина проводились в сравнении с другими видами моторного топлива на экспериментальной установке (рис. 1), в состав которой входили турбонаддувный дизель Д-245.12С, динамометрическая машина «VSETIN» IDS 932N со штатными контрольно-измерительными приборами (весовое устройство динамометрической машины, расходомеры топлива и воздуха, манометр для измерений давления моторного масла в главной масляной магистрали двигателя и др.), а также измерительно-регистрирующую аппаратуру, включающую измерители температуры эксплуатационных материалов (охлаждающей жидкости, моторного масла, топлива и воздуха), датчики (верхней мертвой точки, отметок зубьев маховика, давления цилиндровых газов и частоты вращения коленчатого вала), усилитель заряда, аналого-цифровой преобразователь сигнала и персональный компьютер.

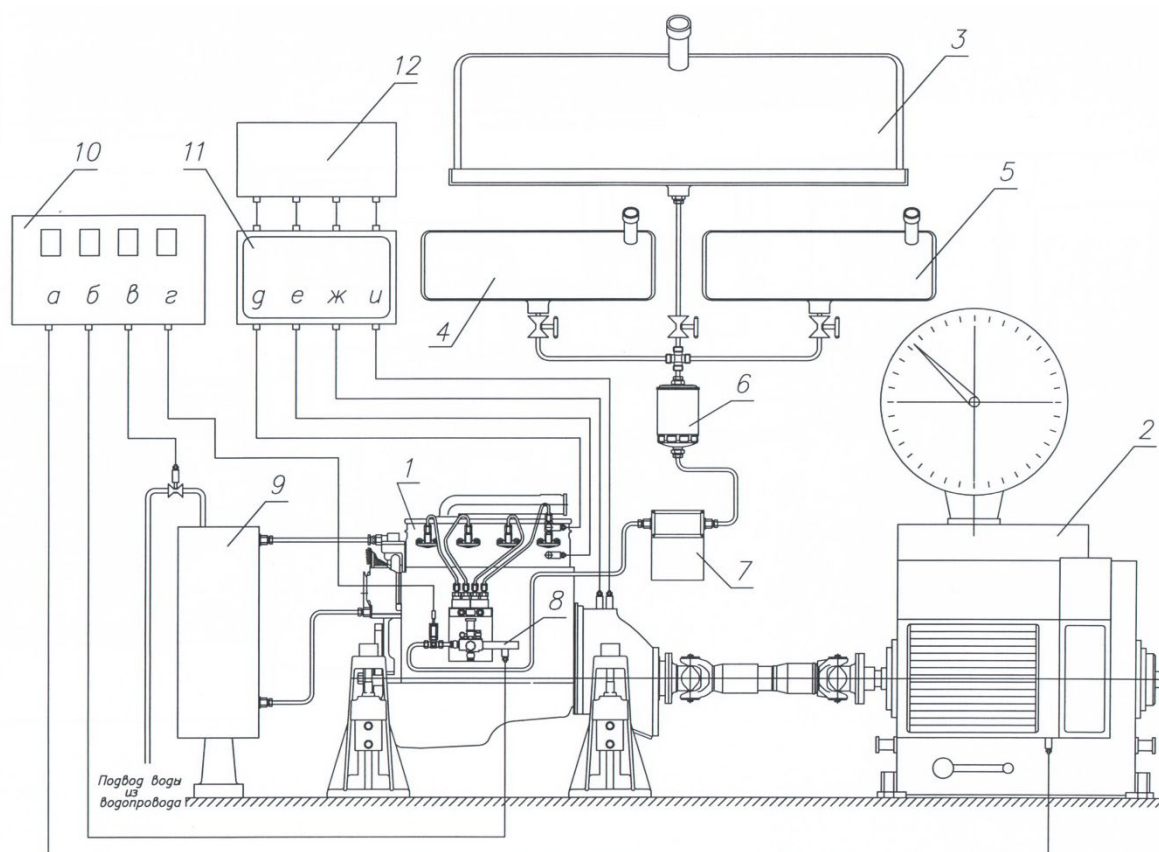


Рис. 1. Экспериментальная установка:

- а* – управление динамометрической машиной; *б* – управление рейкой ТНВД; *в* – управление тепловым состоянием двигателя; *г* – датчик температуры топлива; *д* – датчик давления топлива; *е* – датчик давления газов в цилиндре; *ж* – датчик ВМТ; *и* – датчик отметки зубьев маховика; *1* – дизельный двигатель; *2* – динамометрическая машина с весовым устройством; *3, 4, 5* – топливные баки; *6* – топливный фильтр; *7* – расходомер топлива; *8* – электропривод рейки ТНВД; *9* – смесительный бак охлаждения двигателя; *10* – пульт управления установкой; *11* – аналогово-цифровой преобразователь; *12* – персональный компьютер

Измерение давления газов при индицировании четвертого цилиндра дизеля (как наиболее теплонапряженного) осуществляется пьезокварцевым датчиком давления газов (рис. 2, а), который вворачивается в головку цилиндров дизеля посредством специальной вставки в резьбовое отверстие вместо штатной свечи накаливания таким образом, что осевой канал вставки соединяет внутреннюю полость камеры сгорания четвертого цилиндра с осевым каналом датчика. Охлаждение датчика – водяное, проточное. Сигналы с датчика поступают по соответствующему каналу через усилитель заряда 1 (рис. 2, б) и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) сигнала 2 в компьютер, которые отображаются на его дисплее в виде развернутых индикаторных диаграмм рабочего процесса дизеля в координатах «давление газов – время». Перевод продолжительности рабочего процесса по времени (τ_i , с) в углы поворота коленчатого вала (ϕ_i , град. п.к.в.) осуществляется по формуле:

$$\phi_i = 6 \cdot n \cdot \tau_i, \quad (1)$$

где n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин^{-1} .

Индуктивные датчики отметки зубьев маховика и верхней мертвой точки (ВМТ) устанавливаются на специальном кронштейне напротив зубьев маховика двигателя (рис. 2, в). При работе дизеля через каждые 2,5 град. п.к.в. и при прохождении поршнем четвертого цилиндра верхней мертвой точки соответственно датчик отметок зубьев маховика и датчик ВМТ вырабатывают электрические импульсы (сигналы), поступающие по соответствующему каналу через АЦП в компьютер.

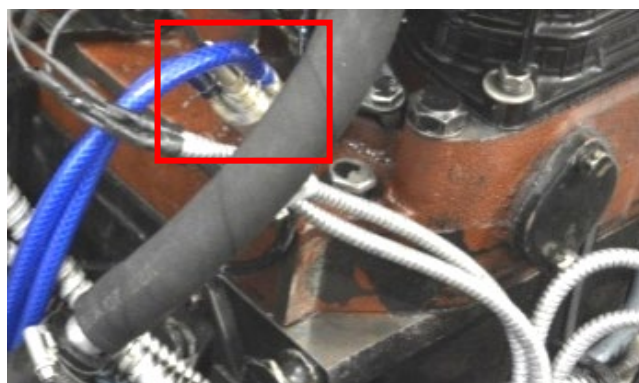
Визуальный контроль за наличием и формой сигналов, поступаемых от датчиков, осуществляется по изображению на дисплее компьютера. Запись всех регистрируемых параметров производится на жесткий диск компьютера.

Для оперативного анализа процесса сгорания исследуемых топлив в дизеле по изменению температуры отработавших газов (ОГ) на различных

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

нагрузочно-скоростных режимах его работы в выпускном коллекторе системы выпуска ОГ перед турбокомпрессором установлен термоэлектрический

преобразователь (датчик температуры) ТП-2488В (рис. 3), подключенный к микропроцессорному измерителю ПИД-регулятору ТРМ10.



а) датчик давления цилиндровых газов DW-150



б) усилитель заряда РШ2731Э (1) и АЦП сигнала ЛА-2USB (2)



в) датчики отметки зубьев маховика и верхней мертвой точки

Рис. 2. Измерительно-регистрирующая аппаратура, применяемая для снятия развернутых индикаторных диаграмм дизеля

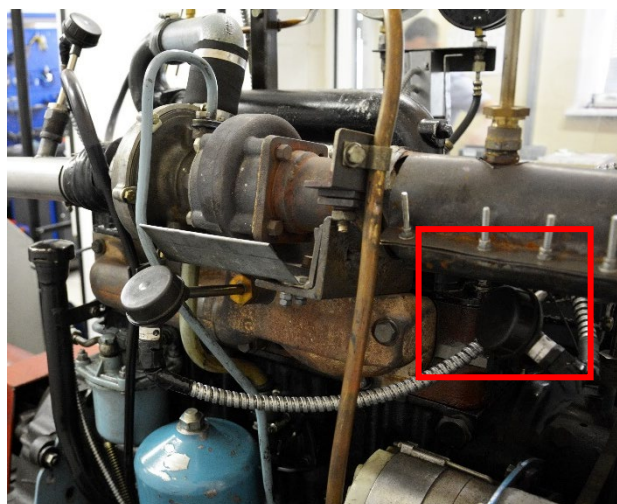


Рис. 3 . Датчик температуры отработавших газов ТП-2488В

За оценочные показатели процесса сгорания топлива в дизеле приняты: максимальное давление цикла (P_z), средняя скорость нарастания давления газов ($(\Delta P / \Delta \phi)_{cp}$), степень повышения давления (λ), период задержки воспламенения (τ_i) и температура отработавших газов в выпускном коллекторе ($t_{ог}$). Указанные показатели определялись при работе

дизеля в условиях внешней скоростной характеристики на нагрузочно-скоростных режимах, характерных для эксплуатации грузового автомобиля.

Максимальное давление цикла (МПа) определяли как среднее арифметическое значение (не менее чем из пятнадцати значений) ординат развернутой индикаторной диаграммы дизеля (рисунок 4):

$$P_z = M_p \sum_{i=1}^{m_p} \frac{P_{zi}}{m_p}, \quad (2)$$

где M_p – масштаб диаграммы по оси ординат, МПа/мм; P_{zi} – величина i -й ординаты, мм; m_p – число ординат индикаторной диаграммы.

Среднюю скорость нарастания (МПа/град.п.к.в.) и степень повышения давления цилиндровых газов определяли по результатам обработки не менее трех развернутых индикаторных диаграмм (рис. 5), которые по величине P_z наиболее близки к максимальному давлению цикла, рассчитанного по формуле (2):

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta \phi}\right)_{cp} = \frac{P_z - P_c}{\phi_z - \phi_c}, \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c}. \quad (4)$$

где P_c – давление в начале сгорания, МПа; ϕ_c и ϕ_z – начало и конец фазы быстрого горения за период ($\phi_z - \phi_c$) повышения давления цилиндровых

газов от давления в начале сгорания (P_c) до момента достижения максимального давления цикла (P_z), град.п.к.в.

Продолжительность периода задержки воспламенения (мс) определяли по результатам обработки не менее трех развернутых индикаторных диаграмм.

Характер изменения оценочных показателей процесса сгорания в условиях скоростной характеристики при работе дизеля на различных видах моторного топлива показан на рисунках 6-9.

Так как компонентный, групповой углеводородный и фракционный состав у всех исследуемых

топлив разный, то это в значительной степени повлияло на продолжительность периода задержки воспламенения (ПЗВ) и, как следствие, на жёсткость процесса сгорания. Так, например, в режиме полной мощности двигателя на номинальной частоте вращения коленчатого вала (к.в.) $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ период ПЗВ составляет: на товарном дизельном топливе ДТ-ЛК5 – 0,429 мс, авиационном керосине ТС-1 – 0,559 мс, биодите 80%ДТ+20%РМ – 0,454 мс, биокеросине – 0,437...0,506 мс (рис. 6). Причем, при работе дизеля на биокеросине с увеличением содержания в нем рапсового масла от 10 % до 50 % продолжительность ПЗВ уменьшается с 0,506 до 0,437 мс.

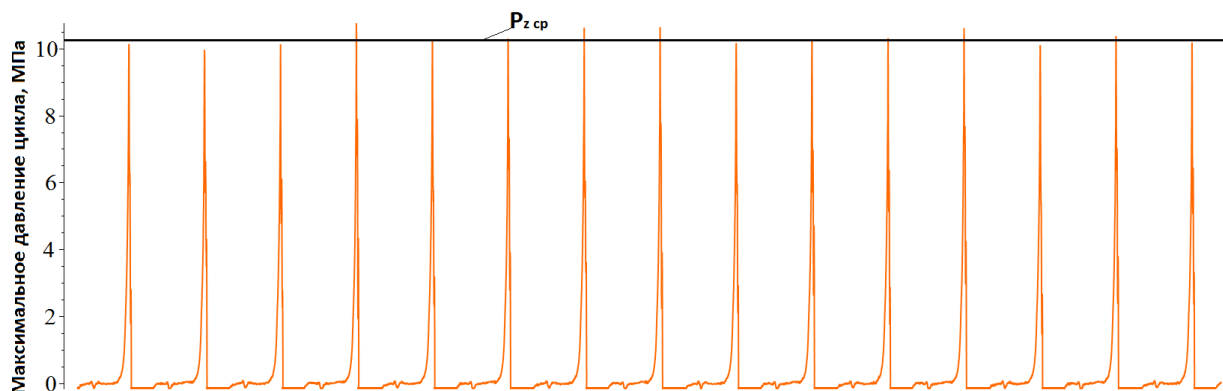


Рис. 4. Фрагменты записи пятнадцати развернутых индикаторных диаграмм дизеля для определения максимального давления цикла

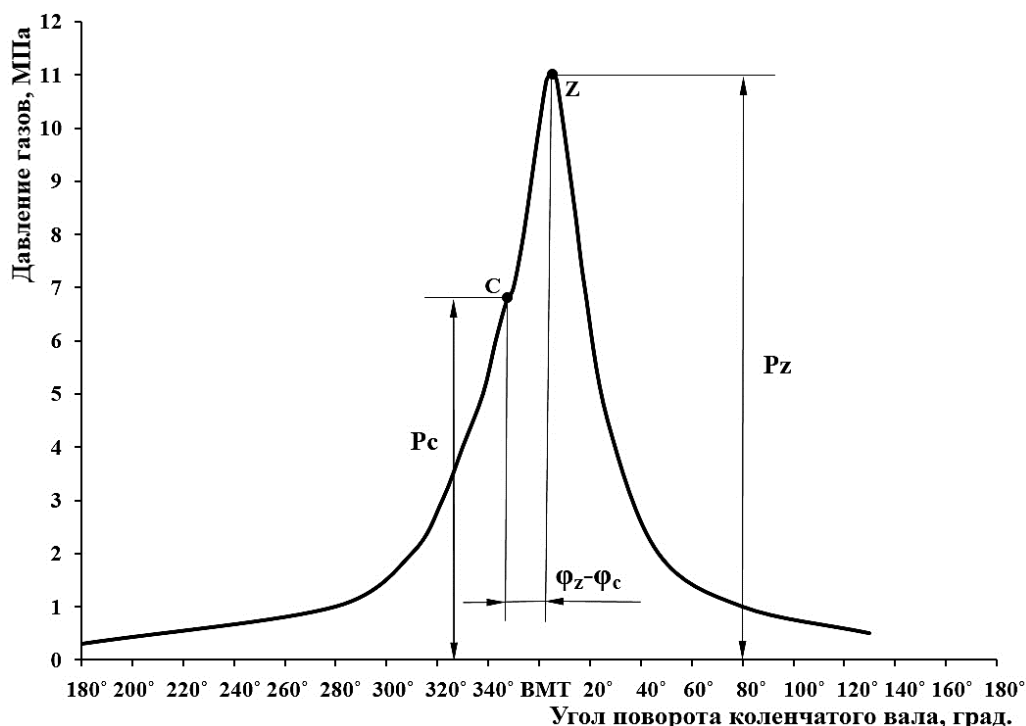
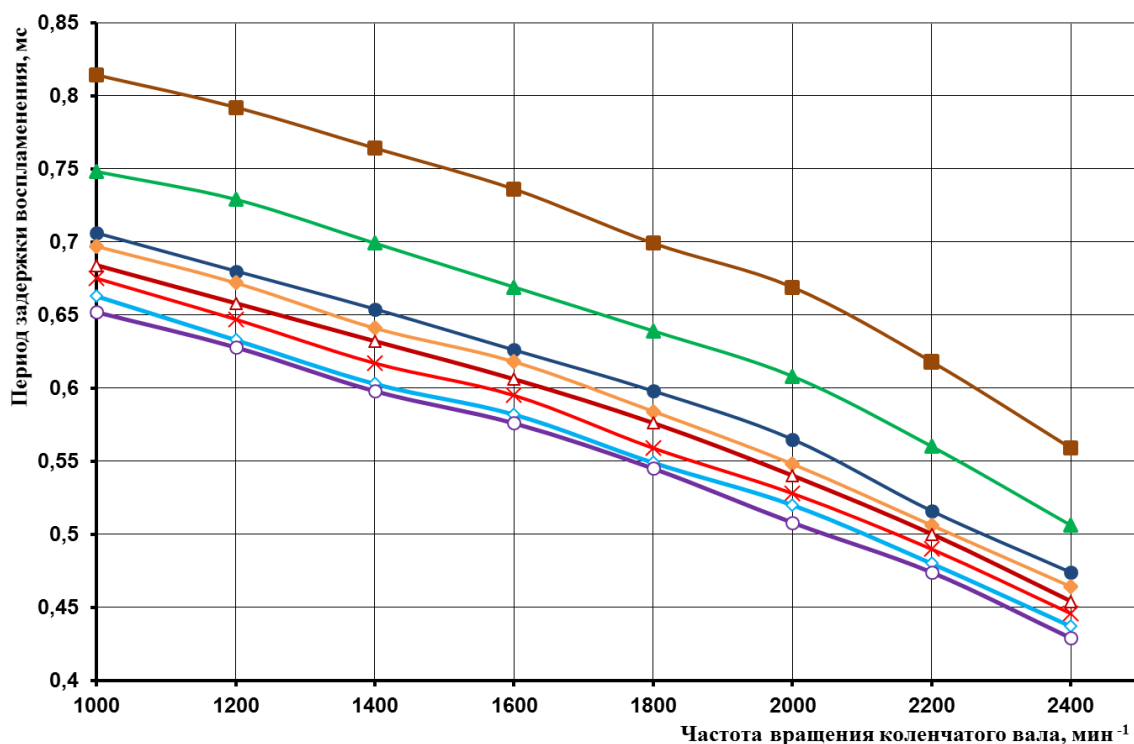
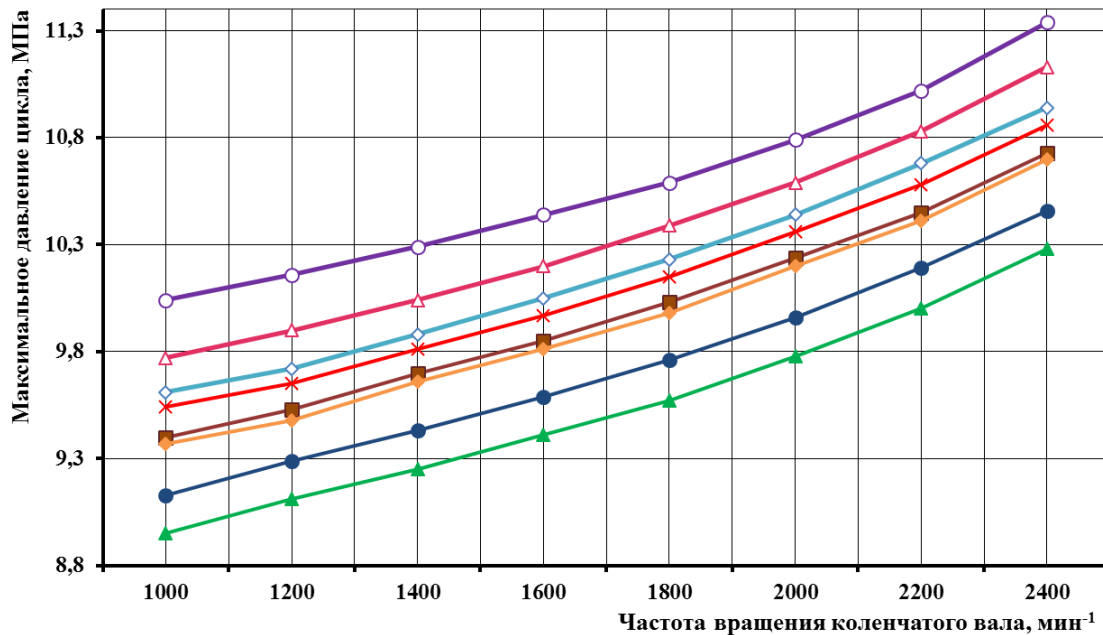


Рис. 5. Обработка развернутой индикаторной диаграммы дизеля для определения средней скорости нарастания и степени повышения давления газов



- ДТ-Л-К5; —■— ТС-1; —△— 80%ДТ+20%РМ;
- ▲— 89,7%ТС-1+10%РМ+0,3%ЭГН; —●— 79,7%ТС-1+20%РМ+0,3%ЭГН;
- ◆— 69,7%ТС-1+30%РМ+0,3%ЭГН; —×— 59,7%ТС-1+40%РМ+0,3%ЭГН;
- ◇— 49,7%ТС-1+50%РМ+0,3%ЭГН

Рис. 6. Изменение периода задержки воспламенения в условиях внешней скоростной характеристики дизеля Д-245.12С на исследуемых т видах топлива

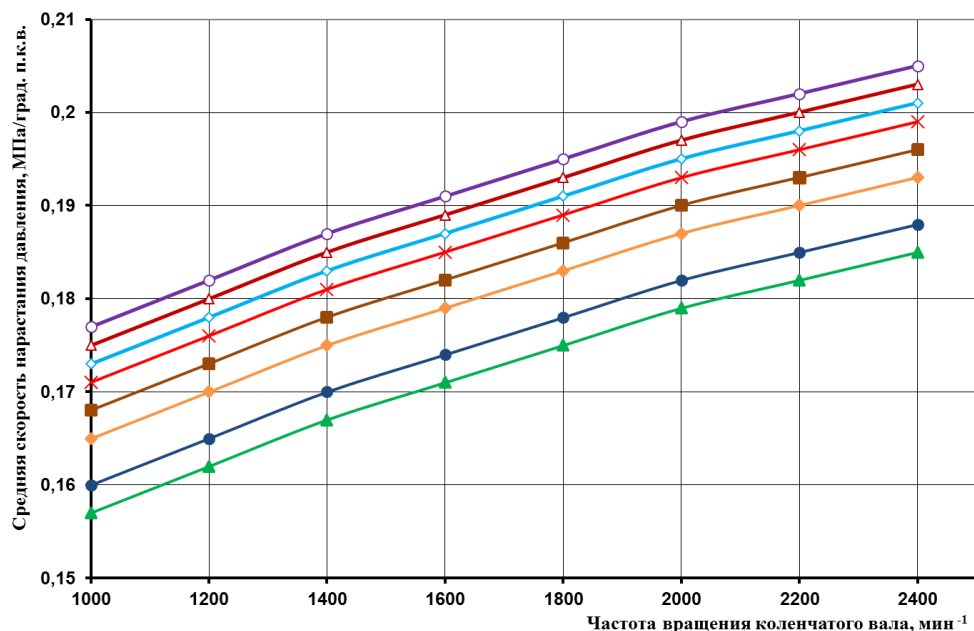


- ДТ-Л-К5; —■— ТС-1; —△— 80%ДТ+20%РМ;
- ▲— 89,7%ТС-1+10%РМ+0,3%ЭГН; —●— 79,7%ТС-1+20%РМ+0,3%ЭГН;
- ◆— 69,7%ТС-1+30%РМ+0,3%ЭГН; —×— 59,7%ТС-1+40%РМ+0,3%ЭГН;
- ◇— 49,7%ТС-1+50%РМ+0,3%ЭГН

Рис. 7. Изменение максимального давления цикла в условиях внешней скоростной характеристики дизеля Д-245.12С на исследуемых видах топлива

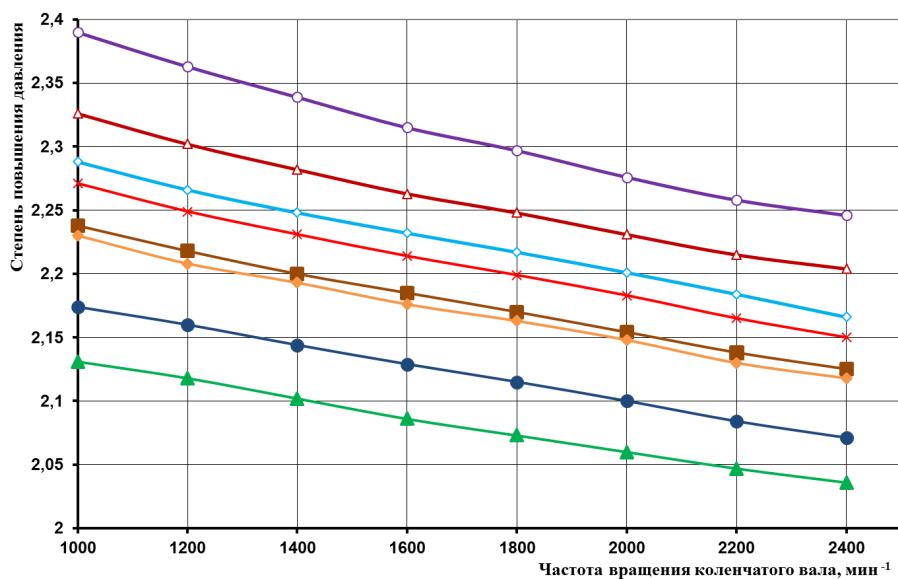
Во всем диапазоне изменения частоты вращения к.в. от 1000 до 2400 мин⁻¹ наибольшее значение давления P_z дизель выдает при работе на нефтяном ДТ и несколько меньшее на биодите, керосине и биокеросине (рис. 7). Причем работа дизеля на биокеросине с содержанием в авиационном керосине 10, 20 и 30% рапсового масла способствует большему снижению максимального давления цикла, чем с содержанием 40 и 50%. Так, например, в режиме

полной мощности дизеля при $n = 2400$ мин⁻¹ максимальное давление цикла составляет: на товарном дизельном топливе ДТ-Л-К5 – 11,34 МПа, биодите 80%ДТ+20%РМ – 11,13 МПа, биокеросине с содержанием РМ от 10% до 50% – 10,28-10,94 МПа. Более близкие значения давления P_z к товарному ДТ имеют образцы биокеросина с повышенным содержанием рапсового масла.



- ДТ-Л-К5; —■— ТС-1; —△— 80%ДТ+20%РМ;
- ▲— 89,7%ТС-1+10%РМ+0,3%ЭГН; —●— 79,7%ТС-1+20%РМ+0,3%ЭГН;
- ◆— 69,7%ТС-1+30%РМ+0,3%ЭГН; —×— 59,7%ТС-1+40%РМ+0,3%ЭГН;
- ◇— 49,7%ТС-1+50%РМ+0,3%ЭГН

Рис. 8. Изменение средней скорости нарастания давления газов в условиях внешней скоростной характеристики дизеля Д-245.12С на исследуемых видах топлива

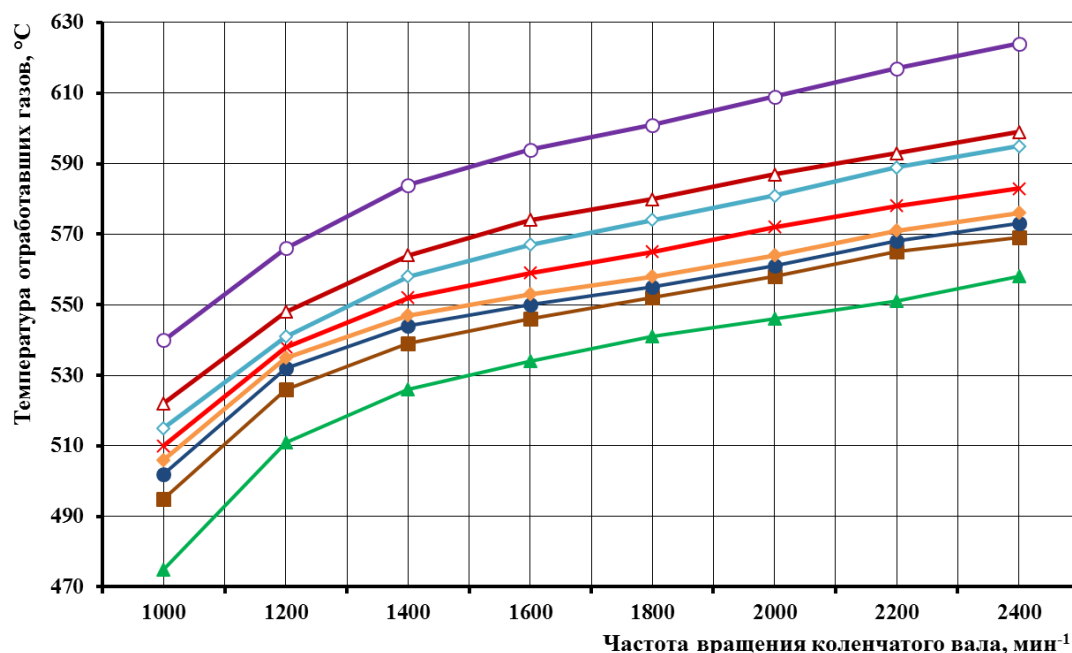


- ДТ-Л-К5; —■— ТС-1; —△— 80%ДТ+20%РМ;
- ▲— 89,7%ТС-1+10%РМ+0,3%ЭГН; —●— 79,7%ТС-1+20%РМ+0,3%ЭГН;
- ◆— 69,7%ТС-1+30%РМ+0,3%ЭГН; —×— 59,7%ТС-1+40%РМ+0,3%ЭГН;
- ◇— 49,7%ТС-1+50%РМ+0,3%ЭГН

Рис. 9. Изменение степени повышения давления газов в условиях внешней скоростной характеристики дизеля Д-245.12С на исследуемых видах топлива

При работе двигателя на нефтяном ДТ средняя скорость нарастания давления газов в цилиндре несколько выше, чем при работе дизеля на других исследуемых топливах (рис. 8). В режиме полной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ и работе дизеля на топливе ДТ-Л-К5 скорость $(\Delta P/\Delta \phi)_{\text{ср}} = 0,205 \text{ МПа/град. п.к.в.}$, биодите 80%ДТ+20%РМ – 0,203 МПа/град.п.к.в., биокеросине с содержанием РМ от 10 % до 50 % – 0,185...0,201 МПа/град.п.к.в. Более низкие значения средней скорости нарастания давления газов имеют образцы биокеросина с содержанием в авиационном керосине 10, 20 и 30 % рапсового масла.

Из анализа рисунков 7-9 следует, что при работе двигателя Д-245.12С на всех опытных образцах биокеросина максимальное давление цикла, средняя скорость нарастания давления газов и степень повышения давления находятся в пределах соответственно 9...12 МПа, 0,15...0,25 МПа/град.п.к.в. и 2,0...2,4. Эти значения показателей процесса сгорания. Значения показателей P_z , $(\Delta P/\Delta \phi)_{\text{ср}}$ и λ , превышающие указанные пределы, приводят к «жесткой» работе дизеля, способствующей увеличению нагрузок на детали кривошипно-шатунного механизма.



- ДТ-Л-К5; —■— ТС-1; —△— 80%ДТ+20%РМ;
- ▲— 89,7%ТС-1+10%РМ+0,3%ЭГН; —●— 79,7%ТС-1+20%РМ+0,3%ЭГН;
- ◆— 69,7%ТС-1+30%РМ+0,3%ЭГН; —×— 59,7%ТС-1+40%РМ+0,3%ЭГН;
- ◇— 49,7%ТС-1+50%РМ+0,3%ЭГН

Рис. 10. Изменение температуры отработавших газов в условиях внешней скоростной характеристики дизеля Д-245.12С на исследуемых видах топлива

Более высокая температура ОГ на всех частотах вращения к.в. наблюдается при работе двигателя на нефтяном ДТ (рис. 10). В режиме полной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ и работе дизеля на топливе ДТ-Л-К5 температура $t_{\text{ог}} = 624 \text{ °С}$, биодите 80%ДТ+20%РМ – 599 °С, керосине ТС-1 – 569 °С, биокеросине с содержанием РМ от 10 % до 50 % – 573-595 °С. Небольшое понижение температуры ОГ при работе дизеля на биокеросине, по сравнению с товарным ДТ, косвенно свидетельствует о незначительном уменьшении доли тепловыделения и несущественном снижении эффективности использования выделяющейся теплоты при его сгорании.

Обсуждение

Результаты экспериментальных исследований показывают, что биокеросин на основе авиационного бензина с добавкой рапсового масла и цетаноповышающей присадки может применяться в

транспортных дизелях в качестве альтернативного моторного топлива.

Биокеросин с объемным содержанием в авиационном керосине ТС-1 от 20 % до 40 % рапсового масла и 0,3 % этилгексилнитрата по плотности, вязкости, воспламеняемости, теплотворной и смазывающей способности наиболее близок к аналогичным показателям стандартного и товарного нефтяного ДТ.

По показателям процесса сгорания (периоду задержки воспламенения, максимальному давлению цикла, средней скорости нарастания давления газов, степени повышения давления) из сравниваемых испытуемых топлив (дизельное смесевое топливо и авиационный керосин) в автомобильном турбонаддувном дизеле и температуре отработавших газов наиболее близким к товарному нефтяному ДТ является биокеросин с объемным содержанием в

авиационном керосине ТС-1 от 40 % до 50 % рапсового масла и 0,3% этилгексилнитрата.

Заклучение

Таким образом, с учетом полученных экспериментальных данных по показателям физико-химических свойств, показателям процесса сгорания и

температуре отработавших газов биокеросин с объемным содержанием компонентов 59,7 % ТС-1+40% РМ+0,3% ЭГН может являться заменителем товарного нефтяного дизельного топлива и использоваться в качестве моторного топлива транспортных дизелей.

Литература

1. Performance and emissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine: A review / S. Che Mat, M. Y. Idroas., M. F. Hamid // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 808-823.
2. Corsini A., Giovannoni V., Nardecchia S. Performance of a common-rail Diesel engine fuelled with rapeseed and waste cooking oils. In *Proceedings of ECOS 2012 – The 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation of Environmental Impact of Energy Systems*, June 26-29, Perugia, Italy, P.82-85.
3. Dabi M., Saha U. K. Application potential of vegetable oils as alternative to diesel fuels in compression ignition engines: A review. *Journal of the Energy Institute* Vol. 92. No. 6. 2019. p.1710-1726.
4. Просвирников Д. Б., Тунцев Д. В., Зиганшин Б. Г. Технология и оборудование переработки активированных растительных отходов в биоэтанол // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2021. Т.16. № 4(64). С. 59-67. doi: 10.12737/2073-0462-2022-59-67.
5. Гайворонский А. И., Гордин М. В., Марков В. А. Проблемы и перспективы использования безуглеродных и низкоуглеродных моторных топлив в условиях различных сценариев перехода к углеродно-нейтральной энергетике // *Двигателестроение*. 2022. № 2 (288). С. 4-28.
6. Совершенствование процессов распыливания и смесеобразования при работе дизеля на смесевых биотопливах / В. А. Марков, А. С. Кулешов, В. А. Неверов, и др. // *Двигателестроение*. 2021. № 1. С. 3-12.
7. Снижение износа плунжерных пар ТНВД применением смесового рапсово-минерального топлива: монография / Д. А. Уханов, А. П. Уханов, Е. Г. Ротанов и др. Пенза: РИО ПГАУ, 2017. 212 с.
8. Уханов А. П., Уханов Д. А., Адгамов И. Ф. Дизельное смесевое топливо: проблемы и инновационные разработки // *Известия Самарской ГСХА*. 2016. Вып.2. С. 46-50.
9. Влияние ультразвуковой обработки растительно-минерального топлива на показатели тракторного дизеля / А. П. Уханов, Д. А. Уханов В. А. Иванови др. // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2010. № 6. С. 5-8.
10. Chisti, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 2007. Vol. 25. P. 294-306.
11. Особенности производства и использования рапсового биотоплива на автотракторной технике / А. П. Уханов, В. А. Рачкин, М. А. Уханов и др. // *Нива Поволжья*. 2008. № 1(6). С. 36-42.
12. Биодиты – альтернативный вид моторного топлива для тракторных дизелей / А. П. Уханов, В. А. Рачкин, Д. А. Уханов и др. // *Нива Поволжья*. 2009. № 2 (11). С. 71-76.
13. Денежко Л. В., Новопашин Л.А., Асанбеков К.А. Исследование рапсовых смесей различного состава в тракторном дизеле // *Аграрный вестник Урала*, 2015. №1 (131). С. 53-54.
14. Володько О. С., Быченин А. П., Хохлов А. Л. Использование органических поверхностно-активных веществ в качестве противоизносных присадок к дизельному топливу // *Вестник Ульяновской государственной академии*. №3(59). С. 12-19.
15. Рыблов М. В., Уханов А. П., Уханов Д. А. Способ и средства улучшения эксплуатационных показателей тракторного дизеля // *Научное обозрение*. 2014. № 3. С. 42-49.
16. Сафонов А. С. Химмотология горюче-смазочных материалов / А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В.В. Гришин. – СПб.: НПИКЦ, 2007. 488 с.
17. Гришин Н. Н., Середа В. В. Энциклопедия химмотологии. М.: Издательство «Перо», 2016. 960 с.
18. Qi D. H., Lee C. F., Jia C. C., Wang P. P., Wu S. T. Experimental investigations of combustion and emission characteristics of rapeseed oil-diesel blends in a two cylinder agricultural diesel engine. *Energy Convers. Manag.* 77, 2014, p. 227-232.
19. Патент №2802026 РФ, МПК С 10L 1/08, С 10L 1/02, С 10L 1/19. Топливная композиция для дизельных двигателей внутреннего сгорания / Д.А. Уханов, А.Д.Черепанова; заявитель и патентообладатель ФАУ 25 ГосНИИхиммотологии Минобороны России. – №2022126888; заяв.17.10.2022; опубл. 22.08.2023, Бюл. №24.

References

1. Performance and emissions of straight vegetable oils and their blends as a fuel in diesel engine: A review / S. Che Mat, M. Y. Idroas., M. F. Hamid et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 808-823.
2. Corsini A., Giovannoni V., Nardecchia S. Performance of a common-rail Diesel engine fuelled with rapeseed and waste cooking oils. In *Proceedings of ECOS 2012 – The 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation of Environmental Impact of Energy Systems*, June 26-29, Perugia, Italy, P.82-85.
3. Dabi M., Saha U. K. Application potential of vegetable oils as an alternative to diesel fuels in compression ignition engines: A review. *Journal of the Energy Institute* Vol. 92. No. 6. 2019. p.1710-1726.

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4. Prosvirnikov D. B., Tuntsev D. V., Ziganshin B. G. Technology and equipment for processing activated plant waste into bioethanol // *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2021. Vol.16. No. 4(64). P. 59-67.
5. Gaivoronskiy A. I., Gordin M. V., Markov V. A. Problems and prospects for usage of carbon-free and low-carbon motor fuels under various scenarios of transition to carbon-neutral energy // *Engine design*. 2022. No. 2 (288). P.4-28.
6. Improvement of the processes of atomization and mixture formation in case of diesel operation on mixed biofuels / V. A. Markov, A. S. Kuleshov, V. A. Neverov, et al. // *Engine design*. 2021. No. 1. P. 3-12.
7. Reduction of wear of plunger pairs of fuel injection pump assembly by using mixed rapeseed-mineral fuel: monograph / D. A. Ukhanov, A. P. Ukhanov, E. G. Rotanov et al. Penza: Publishing house of PSAU. 2017. 212 p.
8. Ukhanov A. P., Ukhanov D. A., Adgamov I. F. Diesel mixed fuel: problems and innovative development // *News of Samara State Agricultural Academy*. 2016. Vol 2. P. 46-50.
9. Influence of ultrasonic treatment of plant-mineral fuel on performance of tractor diesel / A. P. Ukhanov, D. A. Ukhanov, V. A. Ivanovi et al. // *Tractors and agricultural machines*. 2010. No. 6. P. 5-8.
10. Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 2007. Vol. 25. P. 294-306.
11. Features of production and usage of rapeseed biofuel in automotive vehicles / A. P. Ukhanov, V. A. Rachkin, M. A. Ukhanov, et al. // *Volga Region Farmland*. 2008. No. 1(6). P.36-42.
12. Biodites - an alternative type of motor fuel for tractor diesel engines / A. P. Ukhanov, V. A. Rachkin, D. A. Ukhanov, et al. // *Volga Region Farmland*. 2009. No.2 (11). P. 71-76.
13. Denezhko L. V., Novopashin L. A., Asanbekov K. A. Study of rapeseed mixtures of various compositions in tractor diesel engines // *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2015. No.1 (131). P.53-54.
14. Volodko O. S., Bychenin A. P., Khokhlov A. L. The usage of organic surfactants as anti-wear additives for diesel fuel // *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. No. 3 (59). P.12-19.
15. Ryblov M.V., Ukhanov A.P., Ukhanov D.A. Method and means for improvement of performance parameters of a tractor diesel engine // *Scientific review*. 2014. No. 3. P. 42-49.
16. Safonov A. S Ushakov A. I., Grishin V.V. *Chemmotology of fuel and lubricant materials*. St. Petersburg: NPICC, 2007. 488 p.
17. Grishin N. N., Sereda V. V. *Encyclopedia of chemmotology*. Moscow: Pero Publishing House, 2016. 960 p.
18. Experimental investigations of combustion and emission characteristics of rapeseed oil-diesel blends in a two-cylinder agricultural diesel engine / D. H. Qi, C. F. Lee, C. C. Jia., et al. // *Energy Convers. Manag.* 2014. Vol. 77. P. 227-232.
19. Patent № 2802026 of the Russian Federation, IPC C 10L 1/08, C 10L 1/02, C 10L 1/19. Fuel composition for diesel internal combustion engines / D.A. Ukhanov, A.D. Cherepanova; applicant and patent holder FAU 25 State Research Institute of Chemmotology of the Russian Ministry of Defense. – № 2022126888; appl. 17.10.2022; publ. 22.08.2023, Bulletin. № 24.