

Оригинальная статья / Original article

УДК 662.7, 665.11

<http://dx.doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-547-556>

Состав добавки для улучшения характеристик современного дизельного топлива

© С.В. Романцова*, С.А. Нагорнов**, А.Ю. Корнев**

* Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

** Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация

Резюме: Целью исследования являлось создание эфирной композиции, улучшающей экологические и эксплуатационные свойства современного дизельного топлива, полученного глубокой переработкой нефти, включающей стадии гидроочистки и гидрообессеривания. Для улучшения экологических свойств современных дизельных топлив, их цетанового числа и трибологических характеристик было предложено использовать смесь биодизельного топлива и низкомолекулярных предельных эфиров. Биодизельное топливо получали по реакции переэтерификации триацилглицеринов пищевого (прогорклого) подсолнечного масла и метанола. С помощью квантово-химического расчета определено, что в ходе переэтерификации наиболее вероятным направлением атаки нуклеофильного реагента на молекулу триацилглицерина является β -карбонильный атом углерода. Установлено, что в ходе химической реакции не происходит процессов цис-транс-изомеризации двойных связей в радикалах непредельных карбоновых кислот, входящих как в состав триацилглицеринов растительного масла, так и в состав молекул биодизельного топлива. Низкомолекулярные эфиры получали по реакции этерификации. Определены физико-химические свойства нескольких смесей сложных эфиров, включающих от 30 до 90% биодизельного топлива в смеси с несколькими различными насыщенными эфирами небольшой молекулярной массы. Показано, что большинство физико-химических характеристик смесей сложных эфиров (например, вязкость, плотность, температура помутнения и застывания) улучшаются по мере увеличения в ней содержания насыщенных низкомолекулярных эфиров. Но если содержание низкокипящих насыщенных эфиров возрастает до 60–70%, температура начала кипения становится слишком низкой, что может привести к перебоям в работе двигателя, например к образованию воздушных пробок. Если содержание низкокипящих насыщенных эфиров уменьшается до 10–30%, смеси сложных эфиров характеризуются более тяжелым фракционным составом, более высокой плотностью и вязкостью, чем это необходимо для бесперебойной работы дизельного двигателя. В результате анализа физико-химических показателей предложен состав смеси сложных эфиров, включающей 50% об. биодизельного топлива и 50% об. низкомолекулярных насыщенных сложных эфиров. Физико-химические характеристики такой смеси соответствуют требованиям технических условий для дизельных топлив. Таким образом, добавление разработанной смеси сложных эфиров приведет к повышению цетанового числа современных гидроочищенных дизельных топлив и улучшит их смазывающие и экологические свойства.

Ключевые слова: биодизельное топливо, переэтерификация, изомеризация, сложные эфиры

Информация о статье: Дата поступления 20 августа 2018 г.; дата принятия к печати 5 сентября 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

Для цитирования: Романцова С.В., Нагорнов С.А., Корнев А.Ю. Состав добавки для улучшения характеристик современного дизельного топлива // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, N 3. С. 547–556. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-547-556

Composition of additives for improving the performance of contemporary biodiesel fuel

© Svetlana V. Romantsova*, Stanislav A. Nagornov**, Alexey Yu. Kornev**

* Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation

** All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov, Russian Federation

Abstract: The aim of the study was to create an essential composition that improves the environmental and performance properties of contemporary diesel fuel obtained by deep oil refining including the stages of hydrotreating and hydrodesulphurisation. In order to improve the environmental properties of contemporary diesel fuels, such as cetane number and tribological characteristics, a mixture of biodiesel and low molecular weight ethers was proposed for application. Biodiesel was obtained by the transesterification reaction of triacylglycerols from non-edible (rancid) sunflower oil and methanol. By a quantum chemical calculation, the most likely attack direction of a nucleophilic reagent on a triacylglycerol molecule was determined as via a β -carbonyl carbon atom. During the chemical reaction, the absence of cis-trans isomerisation of double bonds was established in the radicals of unsaturated carboxylic acids presented in composition of both the triacylglycerols of vegetable oil and biodiesel molecules. Low molecular weight esters were obtained via the esterification reaction. The physico-chemical properties are determined for several ester mixtures consisting of biodiesel (30–90%) admixed by different saturated esters of lower molecular weight. As the content of saturated low molecular weight esters in mixtures increases, the physico-chemical characteristics of ester mixtures (for example, viscosity, density, cloud point and pour point) tend to improve. However, if the content of low-boiling saturated ethers increases to 60–70%, the boiling point becomes too low, leading to engine interruptions, e.g. the formation of air blocks. In the case of a decrease in the content of low-boiling saturated ethers to 10–30%, ester mixtures are characterised by a heavier fractional composition, as well as a density and viscosity exceeding the levels necessary for the uninterrupted operation of a diesel engine. As a result of the analysis of physico-chemical indicators, the composition of an ester mixture is proposed comprising 50 % vol. of biodiesel and 50 % vol. of low molecular weight saturated esters. The physico-chemical characteristics of such a mixture meet the requirements of the interstate standard for diesel fuels. Thus, the addition of the developed mixture of esters will lead to an increase in the cetane number of hydrotreated diesel fuels, subsequently reflecting in improvement of their lubricating and environmental characteristics.

Keywords: biodiesel, transesterification, isomerisation, esters

Information about the article: Received August 20, 2018; accepted for publication September 5, 2019; available online September 30, 2019.

For citation: Romantsova S.V., Nagornov S.A., Kornev A.Yu. Composition of additives for improving the performance of contemporary biodiesel fuel. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2019, vol. 9, no. 3, pp. 547–556. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-547-556

ВВЕДЕНИЕ

Экологические проблемы современности заставляют искать пути их решения в самых разных областях деятельности человека. Стремление снизить содержание вредных соединений в выхлопных газах транспортных средств приводит к необходимости подвергать нефть все более глубокой обработке. При этом из нее удаляются ароматические вещества и гетероатомные органические соединения (прежде всего те, которые содержат атомы серы), что приводит к улучшению экологических свойств топлив, но одновременно ухудшает ряд его эксплуатационных характеристик. Например, глубокая очистка дизельного топлива приводит к ухудшению его смазывающих свойств и снижению цетанового числа.

Улучшить положение может введение в топливо специальных присадок или добавок [1]. Одной из многофункциональных добавок может быть смесь сложных эфиров метанола и жирных кислот большой молекулярной массы (в радикалах этих кислот обычно присутствует от 16 до 24 атомов углерода). Такая смесь синтезируется по реакции между метанолом и триацилглицеринами растительных масел и носит название «метиловые эфиры растительных масел» (МЭРМ) или биодизельное топливо. Введе-

ние до 20% МЭРМ в товарное дизтопливо нефтяного происхождения позволяет получить смешевое топливо с улучшенными экологическими свойствами, ведь в молекулах эфиров практически нет ни серы, ни ароматических фрагментов, следовательно, при его сгорании не образуются канцерогенные полициклические ароматические углеводороды и оксиды серы, загрязняющие окружающую среду. Поскольку в сложноефирной группе присутствуют два атома кислорода, молекулы биодизельного топлива сгорают с большей полнотой, и, соответственно, выхлопные газы содержат меньше несгоревших углеводородов, частиц сажи и других токсичных соединений [2]. Несомненным преимуществом МЭРМ является его биоразлагаемость, что делает менее опасными проливы топлива. Биодизельное топливо удобнее хранить и перевозить, так как высокая температура вспышки снижает его пожароопасность [3–6].

В настоящее время во всем мире проводятся активные исследования работы дизельных двигателей на биодизельном топливе [7–10]. Современные стандарты, в том числе экологические стандарты Евро-3 – Евро-5, требуют довольно высокого цетанового числа для дизельного топлива (не менее 51). Но топлива для ди-

зельных двигателей, производимые на российских НПЗ, часто имеют цетановое число в диапазоне 48–50 [1]. Для повышения цетанового числа требуется введение в топливо специальных добавок. Недостатком многих цетаноповышающих присадок является ухудшение смазывающих свойств нефтяного топлива после их введения. При добавлении до 20% биодизельного топлива (цетановое число которого может достигать 58), напротив, диаметр пятна износа уменьшается на 35–40% при одновременном увеличении цетанового числа с 48 до 52.

Таким образом, биодизельное топливо может применяться как многофункциональная добавка к нефтяному дизельному топливу, улучшая экологические показатели, смазывающие свойства и цетановое число. Однако ненасыщенные сложные эфиры, входящие в его состав, имеют довольно высокую молекулярную массу и, соответственно, более высокие плотность, вязкость, кислотное и йодное число, могут содержать больше воды, чем нефтяное топливо. Кроме того, фракционный состав биодизельного топлива является более узким и тяжелым. Для нефтяного топлива температура начала кипения не нормируется, но обычно составляет 180 °С, а 280 и 360 °С – нормируемые величины для выкипания 50 и 96% фракций. Температура начала кипения МЭРМ составляет 260–290 °С, а конца кипения – 290–340 °С в зависимости от того, какое растительное масло использовали для его синтеза. Это может ухудшить характеристики работы двигателя, работающего на топливе с такой добавкой. Например, вследствие более тяжелого фракционного состава увеличивается дальность струи биодизельного топлива, и оно может попадать на стенки камеры сгорания, снижая долю объемного смесеобразования и производительность двигателя. Также при работе на биодизельном топливе может наблюдаться лако- и нагароотложение. Ухудшаются низкотемпературные свойства топлива, снижается их стабильность при хранении, поскольку в состав эфиров входят в основном непредельные кислоты, более реакционноспособные, чем углеводороды нефтяного топлива [11].

Во многих исследованиях уделяется внимание нахождению такого соотношения между количеством нефтяного и биодизельного топлива, чтобы полученное топливо имело оптимальные эксплуатационные характеристики и не требовалась модернизация двигателя [4, 12]. Другие исследователи предлагают предварительно нагревать высоковязкое биодизельное топливо [13], но это требует определенных конструктивных изменений двигателя.

Целью данной работы является получение смеси сложных эфиров как многофункциональной добавки к дизельному топливу. Она включает биодизельное топливо и насыщенные

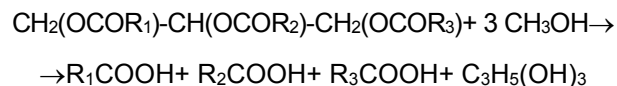
сложные эфиры меньшей молекулярной массы, добавление которых увеличивает стабильность МЭРМ и делает фракционный состав биодизельного топлива более широким, приближая его по свойствам к нефтяному топливу. При этом преимущество по смазывающим и экологическим свойствам сохраняется.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Синтез биодизельного топлива проводили по реакции переэтерификации (метанолиза) с помощью метода, разработанного во Всероссийском научно-исследовательском институте использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, при наложении вращающегося электромагнитного поля в присутствии ферромагнитных частиц [14]. В качестве катализатора использовали гидроксид калия, сырьем для синтеза являлось непищевое (прогорклое) подсолнечное масло. Физико-химические свойства добавки к дизельному топливу определяли в соответствии с ГОСТ Р 52368-2005¹. Для записи колебательных спектров использовали ИК-Фурье спектрометр Infracum FT-801. Анализ показателей токсичности отработанных газов и топливной экономичности дизельного двигателя проводили на дизеле типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5). Испытания двигателя осуществлялись на режимах 13-ступенчатого цикла и внешней скоростной характеристики. Цетановое число определяли на установке ИДТ-90 по методу совпадения вспышек.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Биодизельное топливо, которое можно отнести к возобновляемым источникам энергии, получают по реакции переэтерификации, точнее, метанолиза между метиловым спиртом и триацилглицеринами растительных масел. Для производства биодизельного топлива можно использовать масла различных сельскохозяйственных культур [15], микроводорослей, отработанные (например, фритюрные или прогорклые) масла [16]. Реакцию проводят чаще всего в присутствии щелочи как гомогенного катализатора. Реакция протекает по уравнению:



где R₁, R₂, и R₃, – радикалы жирных кислот.

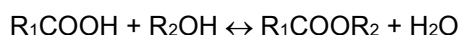
Был проведен квантово-химический расчет молекулы триацилглицерина, что позволило предположить направление атаки нуклеофильного реагента. Известно, что преимущественным

¹ ГОСТ Р 52368-2005. Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия; утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.09.2005 г. № 217.

направлением атаки нуклеофила при гидролизе триацилглицеринов *in vivo* в присутствии ферментов является карбонильный атом углерода в α -положении [17, 18]. По аналогии описывают механизм нуклеофильного замещения при неферментативной реакции метанолиза *in vitro*². Но особенности протекания процесса гидролиза *in vivo* определяются, в первую очередь, строением активного центра молекулы фермента (липазы). В отсутствие фермента механизм реакции может отличаться. Расчеты показали, что наибольший положительный заряд в молекуле 1-олеил-2-линолеил-3-линоленилглицерина приходится на карбонильный атом углерода линолевой кислоты, находящийся в β -положении (0,318), у α -карбонильных атомов углерода он ниже (0,295). Расчет геометрии молекулы показал, что β -карбонильный атом предпочтительнее для атаки и по пространственным соображениям [19].

Двойные связи в радикалах непредельных кислот триацилглицеринов растительных масел находятся в менее стабильной *цис*-конфигурации² [18]. В ходе различных химических реакций, в которые могут вступать триацилглицерины растительных масел (например, гидрирование), может происходить побочная реакция изомеризации, при которой молекула переходит в более стабильную *транс*-конфигурацию. Уточнить конфигурацию двойных связей и вероятность протекания реакции изомеризации можно с помощью метода колебательной спектроскопии. Подтвердить наличие в радикалах двойной связи в *транс*-конфигурации могут колебания, которым соответствуют полосы поглощения в интервале 980–960 см⁻¹. ИК-спектр прогорклого подсолнечного масла содержит четкие интенсивные полосы при 3009 см⁻¹, которые можно отнести к валентным колебаниям связи углерод–водород, а колебания в области 721 см⁻¹ могут быть идентифицированы как неплоские деформационные колебания двойной связи в *цис*-конфигурации. Спектр биотоплива содержит те же характерные для *цис*-конфигурации полосы, колебания в интервале 980–960 см⁻¹ отсутствуют. Можно сделать вывод, что в процессе метанолиза не происходит взаимного превращения геометрических изомеров.

Добавку к биодизельному топливу – насыщенные сложные эфиры небольшой молекулярной массы, синтезировали обычным способом по реакции этерификации:



где R_1 – радикал насыщенной кислоты; R_2 , – радикал спирта.

² Стопский Н.А., Ключкин В.В., Андреев Н.В. Химия жиров и продуктов переработки жирового сырья: учебник. М.: Колос, 1992. 285 с.

Реакцию могут ускорять гомогенные катализаторы, самым распространенным из которых является серная кислота или гетерогенные катализаторы, например, ионообменные смолы. Исходные спирты и карбоновые кислоты для реакции этерификации можно получать, используя продукты нефтехимических или различных биотехнологических производств [20–22]. Например, алифатические спирты небольшой молекулярной массы могут быть выделены путем перегонки сивушных масел, кислоты с 4–6 атомами углерода могут быть синтезированы в результате процессов брожения или биологического окисления.

Смесь сложных эфиров должна быть сбалансированной по составу. Чтобы приблизить свойства биодизельного топлива к характеристикам нефтяного дизельного топлива, необходимо в первую очередь снизить температуру начала кипения и перегонки начальных фракций. Среди насыщенных сложных эфиров небольшой молекулярной массы с подходящей температурой кипения (160–190 °С) надо выбрать те, у которых плотность близка к нормируемой для дизтоплива (860 кг/м³). Например, *изо*-амилбутират ($T_{кип} = 178$ °С, $\rho = 865$ кг/м³) можно использовать для того, чтобы снизить температуру начала кипения топливной добавки.

Для понижения температуры перегонки начальных фракций можно использовать *октил*бутират, *октил*- и *гептил*валераты, *гептил*капроат. Их температуры кипения находятся в интервале от 242 до 260 °С и плотность (при 20 °С) близка к плотности нефтяного дизтоплива – 863–858 кг/м³.

Биодизельное топливо имеет, по сравнению с нефтяным, более высокую вязкость. Поэтому при близких температурах кипения предпочтительнее использовать эфир с меньшей плотностью. Так, *октил*бутират и *гептил*валерат по температуре кипения отличаются только на 1 градус, а вязкость эфира масляной кислоты (1,39 мм²/с) почти в 2 раза ниже, чем у эфира *валериановой* кислоты (2,75 мм²/с), поэтому его использование предпочтительнее.

Авторами данного исследования был получен ряд насыщенных сложных эфиров по реакции этерификации между такими кислотами, как *масляная*, *валериановая*, *капроновая*, и предельными спиртами, содержащими от 5 до 9 атомов углерода.

Синтезированные эфиры и биодизельное топливо, полученное из непищевого подсолнечного масла, смешивали в разных соотношениях, получая смеси сложных эфиров (СЭ), содержащих от 30 до 90% биодизельного топлива и от 2 до 10% различных низкомолекулярных предельных эфиров. Состав некоторых СЭ представлен на рис. 1. В состав СЭ 5 входили те же предельные эфиры, что и в состав СЭ 4, но по 2%, а содержание биодизельного топлива увеличено до 90%.

Для полученных смесей определили ряд физико-химических характеристик: плотность, вязкость, кислотность, фракционный состав,

температуры вспышки, помутнения и застывания в соответствии с ГОСТ Р 52368-2005¹. Полученные данные представлены на рис. 2–4.

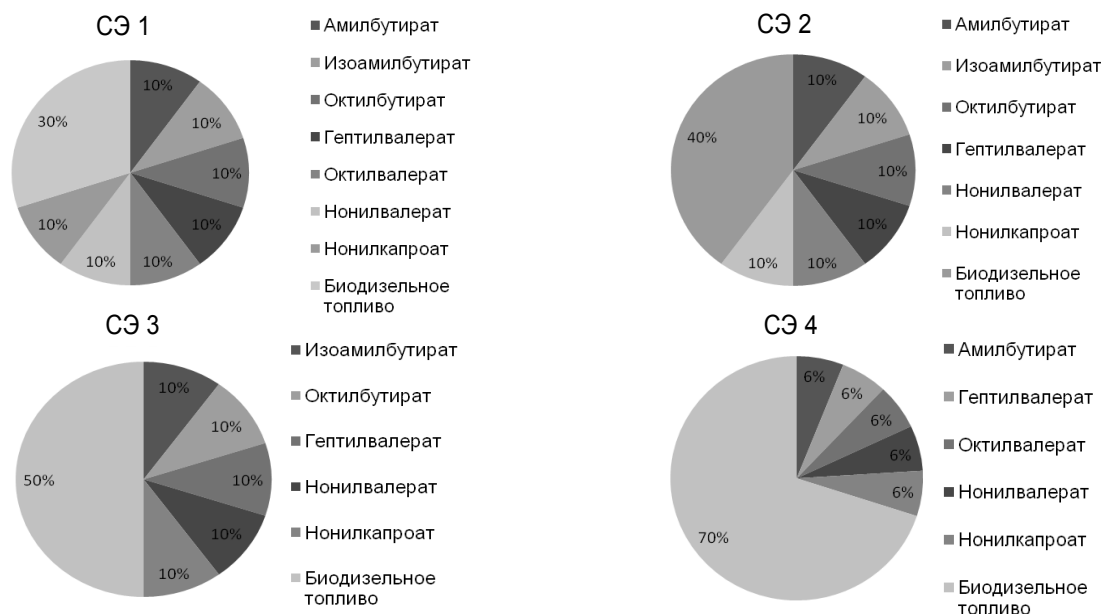


Рис. 1. Состав добавок к дизельному топливу

Fig. 1. Composition of diesel fuel additives

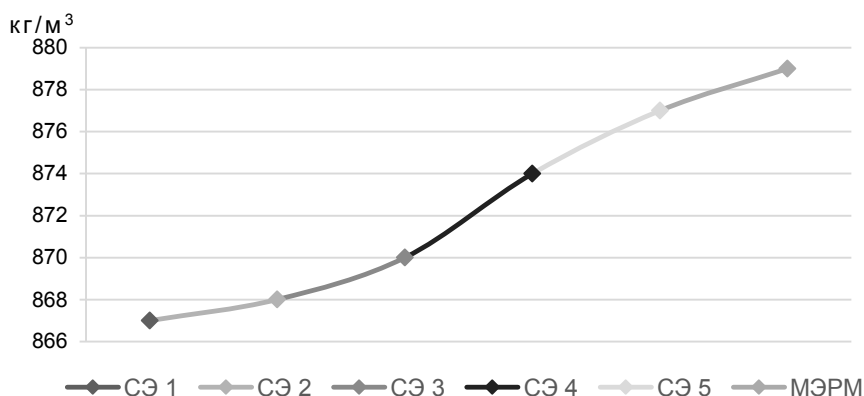


Рис. 2. Зависимость плотности смесей сложных эфиров от их состава

Fig. 2. Relationship between the ester mixtures density and their composition

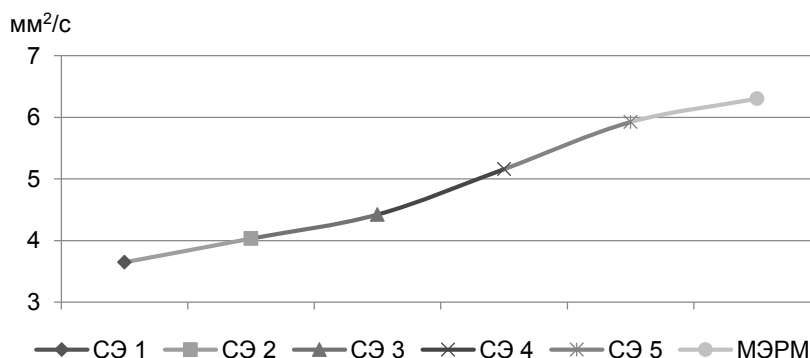


Рис. 3. Зависимость кинематической вязкости смесей сложных эфиров от их состава

Fig. 3. Relationship between the kinematic viscosity of ester mixtures and their composition

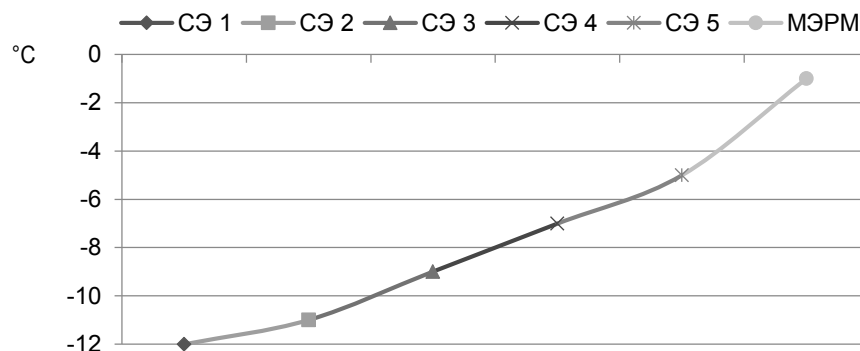


Рис. 4. Зависимость температуры помутнения смесей сложных эфиров от их состава

Fig. 4. Relationship between the cloud point of ester mixtures and their composition

Из представленных на рис. 2–4 графиков видно, что изученные характеристики уменьшаются при увеличении доли низкомолекулярных насыщенных эфиров, что приближает СЭ к нормируемым значениям. Аналогично изменяется и температура застывания. Если для МЭРМ эта величина составляет минус 8 °С, то для СЭ 4 она уменьшается до минус 16 °С, для СЭ 3 – до минус 21 °С, а для составов с самым низким содержанием биодизельного топлива эта температура уже ниже 25 °С. Использование составов СЭ 1 и СЭ 2 затрудняет слишком низкая температура начала кипения (рис. 5).

Если содержание низкокипящих ненасыщенных эфиров возрастает до 60–70%, температура начала кипения становится слишком низкой. Это может привести к перебоям в работе двигателя, например, к образованию воздушных

пробок. Если содержание низкокипящих ненасыщенных эфиров уменьшается до 10–30%, эфирные композиции характеризуются более тяжелым фракционным составом, более высокой плотностью и вязкостью, чем это необходимо для бесперебойной работы дизельного двигателя.

Использование более 60% об. низкомолекулярных эфиров снижает температуру вспышки до 63 и 71 °С у СЭ 1 и СЭ 2, в то время как у СЭ 3 и СЭ 4 температура вспышки составляет 80 и 92 °С, а у СЭ 5 – 116 °С. Чем ниже температура вспышки топлива, тем выше его пожароопасность. Кроме того, высокое содержание низкомолекулярных эфиров уменьшает теплоту сгорания компонента топлива, так как в небольших молекулах доля кислорода возрастает.

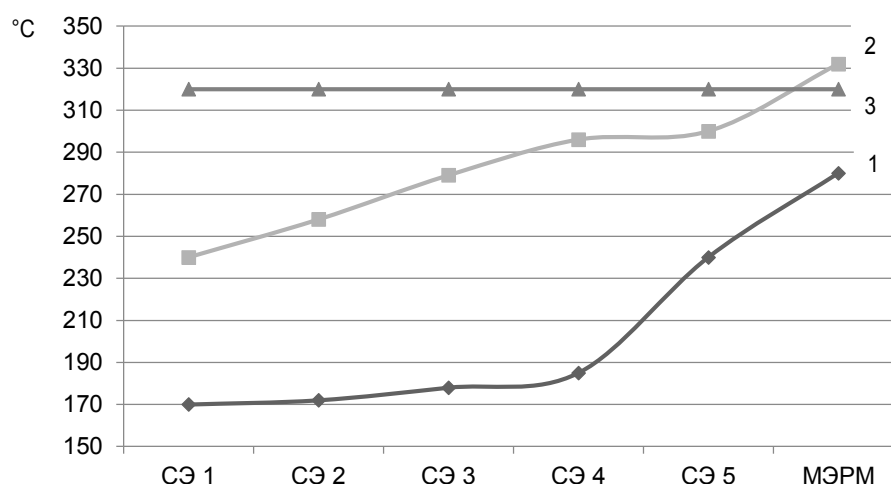


Рис. 5. Зависимость температуры начала кипения (1), температуры выкипания 50% фракций (2) и температуры выкипания 96% фракций (3) смесей сложных эфиров от их состава

Fig. 5. Relationship between initial boiling point (1), 50% fraction boiling point (2), 96% fraction boiling point (3) of ester mixtures and their composition

Таким образом, по всем исследованным характеристикам для современных дизельных двигателей лучше всего подходит смесь СЭ 3. Ее можно использовать как самостоятельное топливо, поскольку физико-химические характеристики соответствуют товарному нефтяному топливу. Однако по экономическим соображениям эту смесь лучше использовать как добавку.

Добавление СЭ 3 к товарному нефтяному топливу (в объемном соотношении 20:80) незначительно влияет на физико-химические свойства нефтяного топлива. Так, кинематическая вязкость при 20 °С увеличилась с 3,2 до 3,44 мм²/с, а плотность при той же температуре – с 826 до

834 кг/м³. При этом даже такое количество добавки позволяет улучшить эксплуатационные характеристики смесового топлива: цетановое число увеличилось с 47 до 49 ед., а диаметр пятна износа снизился с 580 до 440 мкм.

Поскольку полученную смесь эфиров предполагается использовать как компонент современного дизельного топлива, исследованы ее экологические свойства. На рис. 6 приведены величины интегральных удельных выбросов несгоревших углеводородов, оксидов азота и углерода, определенные на режимах 13-ступенчатого цикла на дизеле типа Д-245.12С.

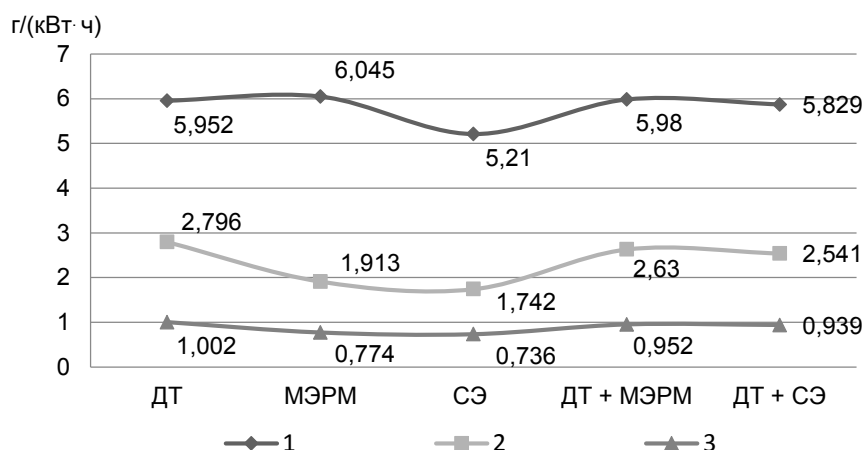


Рис. 6. Зависимость величины интегральных удельных выбросов вредных веществ в выхлопных газах от состава топлива: 1 – оксиды азота; 2 – оксид углерода (II); 3 – несгоревшие углеводороды

Fig. 6. Relationship between the integral specific emissions of harmful substances in exhaust gases and fuel composition: 1 – nitrogen oxides; 2 – carbon monoxide (II); 3 – unburned hydrocarbons

Самым экологически безопасным топливом является смесь сложных эфиров: ее добавление даже в объеме 20% позволяет снизить содержание вредных веществ в выхлопных газах, причем в большей степени, чем добавление такого же объема МЭРМ.

ВЫВОДЫ

Смесь сложных эфиров, содержащая 50% насыщенных сложных эфиров небольшой молекулярной массы и 50% биодизельного топлива, имеет физико-химические характеристики, соответствующие требованиям технических условий для дизельных топлив. Добавление 20% об. Та

кой смеси улучшает экологические свойства топлива, его цетановое число и смазывающие свойства.

С помощью квантово-химического расчета определено, что в процессе метанолиза наиболее вероятным направлением атаки нуклеофильного реагента на молекулу триацилглицерина является β -карбонильный атом углерода. Установлено, что в ходе химической реакции не происходит процессов *цис-транс*-изомеризации двойных связей в радикалах непредельных карбоновых кислот, входящих как в состав триацилглицеринов растительного масла, так и в состав молекул биодизельного топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митусова Т.Н. Современное состояние производства присадок к дизельным топливам. Требования к качеству // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2009. N 9-10. С. 10–16.
2. Nabi M.N., Rasul M.G., Anwar M., Mullins B.J. Energy, exergy, performance, emission and com-

bustion characteristics of diesel engine using new series of non-edible biodiesels // Renewable energy. 2019. Vol. 140. P. 647–657. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.066

3. Гафуров Н.М., Хисматуллин Р.Ф. Преимущества биодизельного топлива // Инновационная наука. 2016. N 5-2 (17). С. 72–74.

4. Варнаков Д.В., Варнаков В.В., Варнакова Е.А. Результаты исследований низкотемпературных свойств и цетанового числа биодизельного топлива // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. N 2 (34). С. 168–173.

5. Плотников С.А., Бузиков Ш.В., Товстыка В.С., Черемисинов П.Н. Определение эксплуатационных показателей трактора «Беларус-922» при работе на смесевом топливе // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. N 3. С. 445–458.

6. Torres B.A., Facio B., Jimenez A., Rogel-Hernández E., Espinoza-Gómez H. The Production of Biodiesel from Blended Commercial Oil in Mexico: A Comparative Study // Journal of the Mexican Chemical Society. 2008. Vol. 52. No 2. P. 136–139.

7. Graboski M.S., McCormick R.L. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines // Progress in Energy and Combustion Science. 1998. Vol. 24. No. 2. P. 125–164. DOI: 10.1016/s0360-1285(97)00034-8

8. İlkiliç C., Yücesu H.S. Investigation of the Effect of Sunflower Oil Methyl Ester on the performance of a Diesel Engine // Energy Sources. 2006. Vol. 27. No. 13. P. 1225–1234. DOI: 10.1080/009083190519311

9. Kinoshita E., Hamasaki K., Jaqin C. Diesel Combustion of Single Compositions of Palm Oil Methyl Ester // SAE Technical Paper Series. 2003. No. 2003-01-1929. P. 1–10.

10. Scholl K.W., Sorenson S.C. Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine // SAE Technical Paper Series. 1993. No. 930934. P. 211–223.

11. Гафуров Н.М., Хисматуллин Р.Ф. Факторы, влияющие на промышленное производство и применение биодизельного топлива // Инновационная наука. 2016. N 5-2 (17). С. 74–75.

12. Дидманидзе О.Н., Варнаков Д.В., Варнаков В.В., Карев А.М., Варнакова Е.А., Платонов А.В. Результаты определения оптимального соотношения компонентов биодизельного топлива при условии обеспечения низкотемпературных свойств и цетанового числа // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2016. N 5 (75). С. 30–35.

13. Anis S., Budiandono G.N. Investigation of

the effects of preheating temperature of biodiesel-diesel fuel blends on spray characteristics and injection pump performances // Renewable energy. 2019. Vol. 140. P. 274–280. DOI: 10.1016/j.rene.2019.03.062

14. Нагорнов С.А., Мещерякова Ю.В., Мещеряков А.Г. Получение биодизельного топлива из непищевого растительного сырья // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 3. N 3. С. 110–116. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-3-110-116

15. Leonte C., Bulgariu L., Robu B., Robu T., Simioniu D. Study of biodiesel production from oilseed plants ii. Evaluation of biodiesel production from some cultivars of rapeseeds // Environmental Engineering and Management Journal. 2010. Vol. 9. No 9. P. 1311–1315. DOI: 10.30638/eemj.2010.170

16. Leung D.Y.C., Guo Y. Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production // Fuel Processing Technology. 2006. Vol. 87. No. 10. P. 883–890. DOI: 10.1016/j.fuproc.2006.06.003

17. Нельсон Д., Кокс М. Основы биохимии Ленинджера: в 3 т. Т. 1. Основы биохимии. Строение и катализ / пер. с англ.; 3-е изд., исправл. М.: Лаборатория знаний, 2017. 694 с.

18. Биохимическое исследование мембран / [Ш. Разин, Ш. Роттем, Д. Невилл мл. и др.] под ред. Э. Медди; пер. с англ. под ред. И.Б. Збарского. М.: Мир, 1979. 460 с.

19. Нагорнов С.А., Романцова С.В., Мещерякова Ю.В., Корнев А.Ю. Спектральный анализ и расчёт индексов реакционной способности компонентов липидной фракции микроводорослей // Наука в Центральной России. 2016. N 1 (19). С. 45–58.

20. Smith M.B., March J. March's Advanced Organic Chemistry: Reactions, Mechanisms, and Structure. 6th ed. Wiley-Interscience, 2007. 2357 p.

21. Пат. № 2483054. Российская Федерация. Способ переработки сивушных масел спиртоводочных комбинатов / Р.В. Кунакова, В.Р. Ахметова, Р.А. Зайнуллин, В.М. Колычев; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Уфимская государственная академия экономики и сервиса»; заявл. 20.03.2012; опубл. 27.05.2013.

22. Wang L.K., Ivanov V., Tay J.-H. Environmental Biotechnology. New York: Humana Press, c/o Springer Science + Business Media, 2010. 975 p. DOI: 10.1007/978-1-60327-140-0

REFERENCES

1. Mitusova T.N. Modern state of production of additives to diesel fuels. Quality requirements. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii*. 2009, no. 9–10, pp. 10–16. (In Russian)

2. Nabi M.N., Rasul M.G., Anwar M., Mullins B.J. Energy, exergy, performance, emission and combustion characteristics of diesel engine using new series of non-edible biodiesels. *Renewable energy*. 2019, vol. 140, pp. 647–657. DOI: 10.1016/j.rene.2019.03.066

ne.2019.03.066

3. Gafurov N.M., Khismatullin R.F. The benefits of biodiesel. *Innovatsionnaya nauka*. 2016, no. 5–2 (17), pp. 72–74. (In Russian)

4. Varnakov D.V., Varnakov V.V., Varnakova E.A. Results of studies of low temperature properties and cetane number of biodiesel. *Vestnik Ul'yanskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyaistvennoj akademii*. 2016, no. 2 (34), pp. 168–173. (In Russian)

5. Plotnikov S.A., Buzikov Sh.V., Tovstyka V.S., Cheremisinov P.N. Determination of Operational Parameters for Belarus 922 Tractor Running on Mixed Fuel. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2018, vol. 28, no. 3, pp. 445–458. (In Russian)

6. Torres B.A., Facio B., Jimenez A., Rogel-Hernández E., Espinoza-Gómez H. The Production of Biodiesel from Blended Commercial Oil in Mexico: A Comparative Study. *Journal of the Mexican Chemical Society*. 2008, vol. 52, no 2, pp. 136–139.

7. Graboski M.S., McCormick R.L. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1998, vol. 24, no. 2, pp. 125–164. DOI: 10.1016/s0360-1285(97)00034-8

8. İlkılıç C., Yücesu H.S. Investigation of the Effect of Sunflower Oil Methyl Ester on the performance of a Diesel Engine. *Energy Sources*. 2006, vol. 27, no. 13, pp. 1225–1234. DOI: 10.1080/009083190519311

9. Kinoshita E., Hamasaki K., Jaqin C. Diesel Combustion of Single Compositions of Palm Oil Methyl Ester. *SAE Technical Paper Series*. 2003, no. 2003-01-1929, pp. 1–10.

10. Scholl K.W., Sorenson S.C. Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine. *SAE Technical Paper Series*. 1993, no. 930934, pp. 211–223.

11. Gafurov N.M., Khismatullin R.F. Factors affecting the industrial production and use of biodiesel. *Innovatsionnaya nauka*. 2016, no. 5–2 (17), pp. 74–75. (In Russian)

12. Didmanidze O.N., Varnakov D.V., Varnakov V.V., Karev A.M., Varnakova E.A., Platonov A.V. Determining optimal ratio of biodiesel components while obtaining its low temperature properties and cetane number. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskii gosudarstvennyi agroinzhenernyi universitet im. V.P. Goryachkina"*. 2016, no. 5 (75), pp. 30–35. (In Russian)

13. Anis S., Budiandono G.N. Investigation of the effects of preheating temperature of biodiesel-diesel fuel blends on spray characteristics and injection pump performances. *Renewable energy*. 2019,

vol. 140, pp. 274–280. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.062

14. Nagornov S.A., Meshcheryakova Yu.V., Meshcheryakov A.G. Biodiesel production from non-food raw material. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2017, vol. 3, no. 3, pp. 110–116. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-3-110-116

15. Leonte C., Bulgariu L., Robu B., Robu T., Simioniu D. Study of biodiesel production from oilseed plants ii. Evaluation of biodiesel production from some cultivars of rapeseeds. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2010, vol. 9, no 9, pp. 1311–1315. DOI: 10.30638/eemj.2010.170

16. Leung D.Y.C., Guo Y. Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*. 2006, vol. 87, no. 10, pp. 883–890. DOI: 10.1016/j.fuproc.2006.06.003

17. Nelson D.L., Cox M.M. *Leninger Principles of Biochemistry*. New York: W.H. Freeman and Company, 2003 (Russ. ed.: Nel'son D., Koks M. *Osnovy biokhimii Lenindzhera. Vol. 1. Osnovy biokhimii. Stroenie i kataliz*. Moscow: Laboratoriya znaniy Publ., 2017, 694 p.)

18. *Biochemical Analysis of Membranes*. Ed. by A.N. Maddy. London: Chapman and Hall; New York: John Wiley & Sons, 1976, 513 p. (Russ. ed. *Biokhimicheskoe issledovanie membran*. Ed. by E. Meddi. Moscow: Mir Publ., 1979, 460 p.)

19. Nagornov S.A., Romantsova S.V., Meshcheryakova Yu.V., Kornev A.Yu. Spectrum analysis and calculation of indices reactivity of the components of the lipid fraction of microalgae. *Nauka v Tsentral'noi Rossii*. 2016, no. 1 (19), pp. 45–58. (In Russian)

20. Smith M.B., March J. *March's Advanced Organic Chemistry: Reactions, Mechanisms, and Structure*. 6th ed. Wiley-Interscience, 2007, 2357 p.

21. Kunakova R.V., Akhmetova V.R., Zainullin R.A., Kolychev V.M. *Sposob pererabotki sivushnykh masel spirtovodochnykh kombinatov* [A method for processing fused oils in distilleries]. Patent of RF, no 2483054, 2013.

22. Wang L.K., Ivanov V., Tay J.-H. *Environmental Biotechnology*. New York: Humana Press, c/o Springer Science + Business Media, 2010, 975 p. DOI: 10.1007/978-1-60327-140-0

Критерии авторства

Романцова С.В., Нагорнов С.А., Корнев А.Ю. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Романцова С.В., Нагорнов С.А., Корнев А.Ю. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

Svetlana V. Romantsova, Stanislav A. Nagornov, Alexey Yu. Kornev carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Svetlana V. Romantsova, Stanislav A. Nagornov, Alexey Yu. Kornev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Романцова Светлана Валерьевна,
к.х.н., доцент, доцент кафедры биохимии
и фармакологии,
Тамбовский государственный университет
им. Г.Р. Державина,
✉ e-mail: svromantsova@yandex.ru

Нагорнов Станислав Александрович,
д.т.н., профессор,
ведущий научный сотрудник,
Всероссийский научно-исследовательский
институт использования техники
и нефтепродуктов в сельском хозяйстве,
e-mail: snagornov@yandex.ru

Корнев Алексей Юрьевич,
К.т.н., заместитель директора
по научной работе,
Всероссийский научно-исследовательский
институт использования техники
и нефтепродуктов в сельском хозяйстве,
e-mail: vniitinlab7@yandex.ru

AUTHORS' INDEX

Svetlana V. Romantsova,
Ph.D. (Chemistry), Associate Professor,
Department of Biochemistry and Pharmacology,
Derzhavin Tambov State University,
✉ e-mail: svromantsova@yandex.ru

Alexey Yu. Kornev,
Ph.D. (Engineering), Deputy Director
for Research,
All-Russian Research Institute for Use
of Machinery and Petroleum Products
in Agriculture,
e-mail: vniitinlab7@yandex.ru

Stanislav A. Nagornov,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Leading Researcher,
All-Russian Research Institute for Use
of Machinery and Petroleum Products
in Agriculture,
e-mail: snagornov@yandex.ru