УДК 665.11

DOI: 10.35887/2305-2538-2019-5-110-118

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА
И СПОСОБЫ ИХ ИЗМЕНЕНИЯ**¹Романцова Светлана Валерьевна²Корнев Алексей Юрьевич²Нагорнов Станислав Александрович²Ликсутина Анна Павловна¹ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина»²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт

использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. Биодизельное топливо (БТ) имеет возобновляемую сырьевую базу, обладает лучшими экологическими свойствами и большей безопасностью в эксплуатации, чем нефтяное. Были синтезированы и проанализированы несколько образцов биодизельного топлива из различных растительных масел. Изучали влияние состава биодизельного топлива на его физико-химические и эксплуатационные свойства. Определили, что БТ имеет более высокую плотность, вязкость, степень непредельности, низкотемпературные характеристики, чем углеводороды нефтяных топлив, что может ухудшить характеристики работы дизельного двигателя. Установили, что физико-химические характеристики БТ зависят от соотношения средне- и длинноцепочечных радикалов жирных кислот, а также от степени их непредельности. Показали, что для улучшения температур застывания и помутнения БТ в его составе следует увеличить долю непредельных остатков кислот, но это может ухудшить его окислительную стабильность. Выявили, что для соблюдения баланса требуется наличие в молекулах БТ радикалов непредельных кислот с одной двойной связью (олеиновая и пальмитоолеиновая кислоты). Содержание остатков линолевой и линоленовой кислот (с двумя двойными связями) должно быть минимальным. Установили, что предельные радикалы небольшой длины увеличивают окислительную стабильность и цетановое число, но ухудшают низкотемпературные свойства БТ. Показали, что изменение жирнокислотного состава БТ путем добавления к нему отдельно синтезированных низкомолекулярных предельных сложных эфиров, требует расширения сырьевой базы производства биодизеля и нового аппаратного оформления для реакции этерификации. Другой способ изменения состава триацилглицеринов растительного масла – модификация самого растения путём селекции или генной инженерии.

Ключевые слова: биодизельное топливо, плотность, кинематическая вязкость, температуры застывания и помутнения, генная инженерия.

**PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF BIODIESEL FUEL
AND METHODS OF THEIR CHANGE**¹Romantsova Svetlana²Kornev Alexey²Nagornov Stanislav²Lixutina Anna¹FSBEI HE "Tambov State University named after G.R. Derzhavin"²FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract. Biodiesel (BT) has a renewable raw material base, has better environmental properties and greater operational safety than petroleum. Several biodiesel samples from various vegetable oils were synthesized and analyzed. The influence of the composition of biodiesel on its physical-chemical and operational properties was studied. It was determined that BT has a higher density, viscosity, degree of unsaturation, low temperature characteristics than hydrocarbons of petroleum fuels, which can degrade the performance of a diesel engine. It was found that the physicochemical characteristics of BTs depend

on the ratio of medium- and long-chain radicals of fatty acids, as well as on the degree of their unsaturation. It was shown that in order to improve the pour point and cloud point of BT in its composition, the proportion of unsaturated acid residues should be increased, but this can worsen its oxidative stability. It was revealed that for balance, the presence of unsaturated acid radicals with one double bond (oleic and palmitoleic acids) is required in BT molecules. The content of residues of linoleic and linolenic acids (with two double bonds) should be minimal. It was found that limiting radicals of small length increase oxidative stability and cetane number, but worsen the low-temperature properties of BT. It was shown that a change in the fatty acid composition of BT by adding separately synthesized low molecular weight esters to it requires an expansion of the raw material base for biodiesel production and new hardware for the esterification reaction. Another way to change the composition of triacylglycerols of vegetable oil is to modify the plant itself by selection or genetic engineering.

Keywords: *biodiesel, density, kinematic viscosity, pour point and cloud point, genetic engineering*

Введение. Активное развитие промышленности, сельского хозяйства и транспортной сферы в XX веке стало возможным благодаря использованию нефтяного топлива в двигателях различного типа. Причём в начале века автомобиль воспринимался как экологически чистое транспортное средство, ведь его использование позволило удалить с дорог лошадей, а значит, навоз, мух и переносимые ими болезни. Но уже к середине века стало очевидным негативное влияние веществ, образующихся при сгорании нефтепродуктов, на экологическое состояние окружающей среды. Конец XX и начало XXI века характеризуются активным поиском источников энергии, которые можно было бы использовать как альтернативу нефтяным топливам.

Большинство сельскохозяйственных машин и агрегатов имеют дизельный двигатель, поэтому в сельскохозяйственном производстве расходуется, в основном, дизельное нефтяное топливо, альтернативой которому может быть биодизельное топливо, методы синтеза и способы использования которого активно исследуются во всём мире [1 – 8]. Оно отвечает большинству основных требований к современным энергоносителям, т.к. имеет возобновляемую сырьевую базу, обладает лучшими экологическими свойствами и большей безопасностью в эксплуатации, чем нефтяное топливо:

- сырьевыми источниками для синтеза биодизельного топлива являются растительные масла, компонентами которых являются не углеводороды, а сложные эфиры глицерина и алифатических карбоновых кислот;
- в молекулах сложных эфиров (в отличие от углеводородов) присутствуют атомы кислорода, что способствует более полному сжиганию топлива;
- в маслах практически отсутствуют ароматические и серосодержащие вещества, поэтому при работе двигателя на биодизельном топливе, снижаются выбросы в атмосферу оксидов серы и углерода, полициклических ароматических и несгоревших углеводородов;
- биодизельное топливо обладает более высокой температурой вспышки, легче и быстрее разлагается, чем нефтяное; это облегчает его хранение, транспортировку и ликвидацию случайных или аварийных проливов;
- биодизельное топливо имеет высокое цетановое число (выше 51) и хорошие смазывающие свойства, что позволяет улучшить эти характеристики у современных гидроочищенных нефтяных топлив, отвечающих экологическим требованиям стандартов Евро.

Несмотря на все преимущества, биодизельное топливо используется в лучшем случае как добавка к нефтяному товарному топливу. Это объясняется, в том числе и тем, что сложные эфиры, входящие в состав биодизельного топлива, имеют (по сравнению с углеводородами нефтяных топлив) довольно высокую молекулярную массу, и соответственно более высокую плотность, вязкость, йодное число, более узкий и тяжелый фракционный состав.

Эти отличия могут ухудшить характеристики работы двигателя, использующего такое топливо. Например, следствием утяжеления фракционного состава и увеличения вязкости является увеличение дальности струи биодизельного топлива, из-за чего оно может попадать на стенки камеры сгорания, снижая долю объемного смесеобразования и производительность двигателя и увеличивая лако- и нагароотложение. Более высокая молекулярная масса компонентов приводит к ухудшению низкотемпературных свойств топлива, наличие двойных связей в

большинстве радикалов кислот обуславливает большую реакционную способность сложных эфиров биодизельного топлива и снижает их стабильность при хранении [9]. Высокая вязкость биодизельного топлива требует модернизации двигателя (например, добавления устройства для подогрева топлива перед его поступлением в камеру сгорания) [10].

Поэтому большое внимание уделяется поиску наилучшего соотношения биодизельного и нефтяного топлива для получения смесового топлива, имеющего такие эксплуатационные характеристики, при которых не требовалась бы модернизация двигателя [3, 11].

Однако с целью улучшения физико-химических и эксплуатационных характеристик можно изменить состав самого биодизельного топлива.

Цель работы – проанализировать зависимость физико-химических и эксплуатационных свойств биодизельного топлива от его состава и выбрать направление его изменения различными методами.

Материалы и методы. Синтез индивидуальных эфиров высших кислот и метилового спирта проводили по реакции этерификации, в качестве катализатора использовали серную кислоту. Синтез биодизельного топлива проводили по реакции переэтерификации. В качестве катализатора использован гидроксид калия, сырьём для синтеза являлись следующие виды растительных масел: рапсовое, льняное, кукурузное, подсолнечное, рыжиковое и масло редьки. Физико-химические свойства биодизельного топлива определяли в соответствии с ГОСТ Р 52368-2005. «Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия». Жирнокислотный состав биодизельного топлива определяли с помощью газового хроматографа «Кристалл-2000м», для обработки результатов хроматографического анализа использовалось программное обеспечение «Хроматэк-Аналитик».

Результаты и их обсуждение. Для того, чтобы понимать, в каком направлении необходимо изменять состав биодизельного топлива, надо изучить строение его компонентов и выявить взаимосвязь между строением и физико-химическими и эксплуатационными свойствами топлив. Компонентами биодизельного топлива являются метиловые эфиры жирных кислот (МЭЖК), то есть кислот, входивших в состав триацилглицеринов растительного масла, из которого топливо было синтезировано.

Обычно используют масла тех растений, которые преимущественно произрастают в конкретном регионе. Например, в США в качестве исходного сырья для синтеза биодизельного топлива наиболее подробно изучено соевое масло, а в европейских странах представляет больший интерес рапсовое масло, подсолнечное масло – одно из самых распространённых в России, а страны с тропическим климатом используют кокосовое или пальмовое масло или непищевое масло ятрофы [12, 13]. В последнее время уделяется больше внимания непищевым маслам, таким, как прогорклые и отработанные фритюрные масла, масла микроводорослей и т.д.

Масла, синтезируемые различными растениями, конечно, отличаются по жирнокислотному составу триацилглицеринов, а, следовательно, синтезированное из них биодизельное топливо будет отличаться и по составу и по физико-химическим и эксплуатационным свойствам. Жирнокислотный состав масла одного и того же растения может отличаться в зависимости от сорта и даже от того, в какой местности и каких климатических условиях оно произрастает. Рассмотрим более подробно жирнокислотный состав растительных масел и синтезируемых из них биодизельных топлив (метиловых эфиров алифатических кислот) и их свойства.

Нами были синтезированы и проанализированы несколько образцов биодизельного топлива из различных растительных масел, их состав представлен в таблице 1.

Свойства образцов биодизельного топлива из различных растительных масел представлены в таблице 2. Видно, что не все параметры биодизельного топлива соответствуют требованиям, предъявляемым к товарному дизельному топливу (например, плотность, вязкость и низкотемпературные свойства). Этот недостаток можно устранить, используя смеси биодизельного и нефтяного топлива или добавив к биодизельному топливу низкомолекулярные предельные сложные эфиры, полученные по реакции этерификации из нефтяных или возобновляемых растительных компонентов. Их присутствие увеличивает стабильность биодизельного топлива, снижает его вязкость и плотность; делает фракционный состав более широким, приближая его по свойствам к нефтяному топливу.

Таблица 1 – Содержание метиловых эфиров высших алифатических кислот в биодизельном топливе, синтезированном из различных масел

Состав биотоплива: метиловый эфир	Содержание эфиров в образцах, полученных из масел, %					
	рапса	подсол- нечника	льна	рыжика	кукурузы	редьки
Миристиновой кислоты	0,33	4,56	7,56	0,29	–	10,64
Пентадекановой кислоты	–	–	3,65	–	–	–
Пальмитиновой кислоты	3,99	8,61	6,46	5,65	8,31	11,85
Пальмитоолеиновой	–	0,60	–	–	–	–
Стеариновой кислоты	–	4,77	2,25	–	6,17	3,53
Олеиновой кислоты	59,53	49,25	7,89	67,46	47,09	31,82
Линолевой кислоты	20,29	18,90	23,32	2,39	37,43	24,59
Линоленовой кислоты	6,03	8,42	46,73	–	0,53	9,38
Арахидиновой кислоты	4,32	3,43	2,14	17,9	0,15	–
Гадолеиновой кислоты	0,66	0,34	–	1,6	0,32	–
Бегеновой кислоты	0,25	1,73	–	0,59	–	–
Эйкозеновой кислоты	–	0,17	–	–	–	8,19
Эруковой кислоты	4,60	–	–	4,12	–	–

Таблица 2 – Физико-химические показатели образцов биодизельного топлива, полученных из различных масел

Наименование показателя	Величина показателя для образцов, полученных из масел					
	рыжика	подсолнечника	кукурузы	рапса	льна	редьки
Цетановое число	–	53	52	53	53	–
Плотность 15°C, кг/м ³	884	880	880	882	888	876
Вязкость кинематическая при 40 °C, мм ² /с	–	5,08	4,97	5,00	4,44	4,94
Вязкость кинематическая при 20 °C, мм ² /с	6,48	6,59	6,77	6,77	5,55	7,41
Температура застывания, °C	- 11	- 7	- 8	- 8	- 9	- 12
Температура помутнения, °C	- 4	- 1	- 1	0	- 3	+ 3
Температура вспышки, (в закрытом тигле), °C	158	140	152	161	153	121

Биодизельное топливо, например, имеет, по сравнению с нефтяным, более высокую вязкость. Поэтому можно добавить октиловый эфир бутановой кислоты, имеющий вязкость всего 1,39 мм²/с. почти в 2 раза ниже, чем у эфира валериановой кислоты (2,75 мм²/с). При введении низкомолекулярных эфиров также улучшаются низкотемпературные свойства биодизельного топлива, а преимущество по смазывающим и экологическим свойствам сохраняется [15, 16]. Но это потребует создания отдельной технологической цепи для проведения реакции этерификации между низкомолекулярными предельными спиртами и кислотами, а также расширения сырьевой базы производства биодизеля, в том числе и за счёт продуктов нефтепереработки.

Однако состав биодизельного топлива можно изменить и другим способом. Длина углеродной цепи, степень непредельности и разветвления можно изменить посредством как селекции растений и генноинженерных подходов, так и путем химической обработки биодизельного топлива для расщепления некоторых двойных связей или образования разветвленных изомеров. Однако исследований в этом направлении очень мало.

Сравнивая данные таблиц 1 и 2 видим, что прослеживается определённая корреляция между жирнокислотным составом и физико-химическими свойствами биодизельного топлива. Например, у эфиров из подсолнечного и кукурузного масел в составе преобладают эфиры линолевой,

олеиновой и пальмитиновой кислот и они имеют близкие значения плотности, вязкости, температур застывания и помутнения.

Самое высокое содержание эфиров линоленовой кислоты (с тремя двойными связями в радикале) у биодизельного топлива из масел льна и редьки и именно у них наблюдается самая низкая вязкость и самая высокая плотность у топлива из льняного масла.

Нами также была исследована зависимость плотности и вязкости биодизельных топлив, синтезированных из различных масел, от температуры. Установлено, что зависимость плотности от температуры является линейной, а аналогичная зависимость для вязкости – экспоненциальная.

Но биодизельное топливо представляет собой смесь 7-11 компонентов, оказывающих взаимное влияние друг на друга. Поэтому нами были синтезированы и проанализированы несколько образцов метиловых эфиров отдельных жирных кислот (таблица 3).

Таблица 3 – Свойства метиловых эфиров жирных кислот

наименование	T _{пл} , °C	T _{кип} , °C	Вязкость при 40 °C, мм ² /с	Цетановое число [1]	Теплота сгорания, кДж/моль	Плотность при 15 °C, кг/м ³
метиловый эфир октановой кислоты	- 40	193	1,18	33,6	1313	881
метиловый эфир декановой кислоты	-12,8	228	1,71	47,2	1625	876
метиловый эфир лауриновой кислоты	5	266	2,41	61,4	1940	873
метиловый эфир миристиновой кислоты	18,5	286	3,23	66,2	2254	–
метиловый эфир пальмитиновой кислоты	30,5	416	4,36	74,5	2550	–
метиловый эфир стеариновой кислоты	39	442	4,74	86,9	2859	–
метиловый эфир олеиновой кислоты	- 20	216	4,40	55	2828	877
метиловый эфир линолевой кислоты	- 35	207	3,56	42,2	–	888
метиловый эфир линоленовой кислоты	ниже -35	207	3,14	–	–	901

Из представленных данных видно, что присутствие двойной связи снижает температуры плавления и кипения метиловых эфиров непредельных кислот по сравнению с соответствующими производными предельных кислот [14]. Следовательно, увеличение доли непредельных компонентов топлива улучшает его низкотемпературные свойства.

Однако использование топлива с очень высокой концентрацией непредельных компонентов нежелательно, т.к. нагревание более ненасыщенных жирных кислот ускоряет реакцию полимеризации, что может приводить к образованию отложений или к ухудшению качества смазывающего масла. Та же реакция делает биодизельное топливо менее устойчивым к окислению в процессе хранения. Этот эффект возрастает с количеством двойных связей в цепочке жирных кислот (от олеиновой кислоты к линоленовой). Поэтому, например, льняное масло является не самым удачным сырьём для синтеза биодизельного топлива, т.к. в нём самое высокое содержание линоленовой кислоты. Более предпочтительным является присутствие в топливе олеиновой или пальмитолеиновой кислот с одной двойной связью.

Существуют конкретные способы для увеличения уровня олеиновой кислоты и снижения уровня насыщенных жирных кислот в растительном семени [17], включающие:

1) уменьшение длины первой гетерологичной последовательности гена FAD2, пока величина его супрессии из растения, по меньшей мере частично, не снижается по отношению к величине супрессии гена FAD2 в растительной клетке, содержащей аналогичный генетический фон и вторую гетерологичную последовательность FAD2, где вторая гетерологичная последовательность FAD2 состоит из более эндогенной последовательности FAD2, чем первая гетерологичная последовательность FAD2;

2) экспрессию гетерологичной FАТВ последовательности, способной по меньшей мере частично снижать экспрессию гена FАТВ в растительной клетке относительно супрессии FАТВ в растительной клетке с аналогичным генетическим фоном, но без гетерологичной последовательности FАТВ;

3) культивирование растения, которое производит семена с пониженным содержанием насыщенных жирных кислот по сравнению с семенами из растения, имеющего аналогичный генетический фон, но не имеющего первой гетерологичной последовательности FАD2 и гетерологичной последовательности FАТВ.

Так же улучшить низкотемпературные свойства биодизельного топлива могут сложные эфиры с меньшей длиной цепи и/или имеющие более разветвленную углеродную цепь.

Так, масла, которые содержат значительные фракции низкомолекулярных триглицеридов, могут быть пригодны для непосредственного применения в качестве топлива. Действительно, сырье из видов *Cuphea*, содержит масла, главным образом состоящие из триаприлинглицерина и триапринглицерина (кислоты в них содержат 8 и 10 атомов углерода). Современные технологии переноса ДНК могли бы обеспечить перенос генов, контролирующих синтез низкомолекулярных триацилглицеридов из таких видов, как *Cuphea*, в другие, более традиционные масличные культуры [17].

Предельные неразветвленные радикалы в составе молекул биодизельного топлива ухудшают его низкотемпературные свойства, но увеличивают окислительную стабильность и цетановое число биодизельного топлива [17]. Следовательно, способы сдвига жирнокислотного пула растительного масла в направлении насыщенных радикалов улучшают воспламеняемость и окислительную стабильность полученного биодизельного топлива, но ухудшают низкотемпературные свойства. Необходимо соблюдать баланс между длиной и степенью ненасыщенности радикалов в молекулах триацилглицеридов масел и, следовательно, в молекулах синтезируемого из масла биодизельного топлива.

Таким образом, растение (например, рапс) можно генетически модифицировать так, чтобы оно продуцировало масло, в молекулах триацилглицеридов которого присутствовали остатки предельных кислот со средней длиной цепи и кислоты с 16-18 атомами углерода с одной двойной связью в радикале (например, пальмитоолеиновая и олеиновая кислоты) и отсутствовали или присутствовали в незначительном количестве остатки кислот с большим числом двойных связей (например, линолевая, линоленовая и арахидоновая). Для этого вводят стоп-кодон в кодирующую последовательность гена FАD2, снижают активность одной из десатураз. В результате уровень олеиновой кислоты в масле увеличится при одновременном снижении содержания линолевой и линоленовой кислот. Чтобы увеличить содержание предельных кислот с 8-12 атомами углерода трансформируется геном растения геном ацилтиоэстеразы куфеи, имеющей специфичность к цепочкам с короткой длиной.

Генетически модифицированный таким образом рапс продуцирует масло, имеющее совсем другой жирнокислотный состав (таблица 4):

Таблица 4 – Содержание метиловых эфиров алифатических кислот в биодизельном топливе, синтезированном из генетически модифицированного и немодифицированного рапсового масла

Наименование	Содержание эфиров в образцах, полученных из масел, %	
	немодифицированное	модифицированное
метиловый эфир октановой кислоты	–	5
метиловый эфир декановой кислоты	–	5
метиловый эфир лауриновой кислоты	–	15
метиловый эфир миристиновой кислоты	0,33	менее 1
метиловый эфир пальмитиновой кислоты	3,99	менее 1
метиловый эфир стеариновой кислоты	–	менее 1
метиловый эфир олеиновой и пальмитолеиновой кислот	79,82	70
метиловый эфир линолевой кислоты	2,09	менее 1
метиловый эфир линоленовой кислоты	6,03	менее 1
метиловый эфир арахидоновой кислоты	4,32	
метиловый эфир эруковой кислоты	4,60	
метиловые эфиры прочих кислот		

Биодизельное топливо, полученное из модифицированного масла, имеет температуру застывания не минус 8, а минус 20°C.

Ещё более перспективным направлением является использование для синтеза биодизельного топлива масел, полученных при переработке микроводорослей. Культивирование микроводорослей может быть организовано в реакторах при постоянных условиях (температура, освещённость, состав питательной среды), что позволит получать масло с постоянным жирнокислотным составом, независящим (как в случае с растениями) от района произрастания и климатических факторов. Генная модификация водорослей позволит обеспечить необходимый жирнокислотный состав молекул триацилглицеринов.

Заключение. Проведённые исследования показали, что существует корреляция между жирнокислотным составом и физико-химическими характеристиками биодизельного топлива. Плотность, вязкость и низкотемпературные характеристики биодизельного топлива зависят от соотношения средне- и длинноцепочечных радикалов жирных кислот, а также от степени их непредельности. Наличие двойных связей с одной стороны, улучшает низкотемпературные свойства биодизельного топлива, а, с другой стороны, увеличивает количество нагара при работе на таком топливе и снижает его окислительную стабильность. Наиболее предпочтительным является присутствие в топливе радикалов кислот с одной двойной связью. Увеличить окислительную стабильность (и цетановое число) могут предельные радикалы небольшой длины, но они ухудшают низкотемпературные свойства топлив.

Изменить жирнокислотный состав биодизельного топлива можно путем добавления к нему отдельно синтезированных низкомолекулярных предельных сложных эфиров. Но это требует расширения сырьевой базы производства биодизеля и нового аппаратного оформления для реакции этерификации.

Другой способ изменения состава триацилглицеринов растительного масла – модификация самого растения путём селекции или генной инженерии. Воздействуя на гены, отвечающие за длину цепи жирной кислоты (ацилтиоэстеразы) или за её степень непредельности (десатуразы), можно получить растение с желательным набором остатков кислот в молекуле триацилглицерина.

Список литературы

1. Nabi M.N., Rasul M.G., Anwar M. Energy, exergy, performance, emission and combustion characteristics of diesel engine using new series of non-edible biodiesels // *Renewable energy*, 2019, – V. 140. – P. 647-657.
2. Гафуров Н.М., Хисматуллин Р.Ф. Преимущества биодизельного топлива // *Инновационная наука*, 2016. – № 5. – С. 72-74.
3. Варнаков Д.В., Варнаков В.В., Варнакова Е.А. Результаты исследований низкотемпературных свойств и цетанового числа биодизельного топлива // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, 2016. – № 2(34). – С. 168-173.
4. 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. – Том 28. – № 3. – С. 445-458.
5. Arevalo B., Facio B., Jimenez A. The Production of Biodiesel from Blended Commercial Oil in Mexico: A Comparative Study // *Journal of the mexican chemical society*, 2008. – V. 52. – № 2. P. 136-139.
6. Graboski M.S., McCormick R.L. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines // *Progress in Energy and Combustion Science*, 1998. – V. 24. – P. 125-164.
7. Ikilic C., Yucesu H. Investigation of the Effect of Sunflower Oil Methyl Ester on the performance of a Diesel Engine // *Energy Sources*, 2006. – V. 27. – № 13. – P. 1225-1234.
8. Kinoshita E., Hamasaki K., Jaqin C. Diesel Combustion of Single Compositions of Palm Oil Methyl Ester // *SAE Technical Paper Series*, 2003. – № 2003-01-1929. – P. 1-10.
9. Гафуров Н.М., Хисматуллин Р.Ф. Факторы, влияющие на промышленное производство и применение биодизельного топлива // *Инновационная наука*, 2016. – № 5. – С. 74-75.
10. 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. V. 140. – P. 274-280.

11. 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. – № 5(75). – С. 30-35.
12. Knothe, G. Dependence of Biodiesel Fuel Properties on the Structure of Fatty Acid Alkyl Esters // Fuel Processing Technology, 2005. № 86. P. 1059-1070.
13. Azeez A.M., Fasakin A.O., Orege J.I. Production, Characterisation and Fatty Acid Composition of *Jatropha curcas* Biodiesel as a Viable Alternative to Conventional Diesel Fuel in Nigeria // Green and Sustainable Chemistry, 2019. – V.9. № 1. – P. 1-10
14. Stournas, S.; Lois, E.; Serdari, A. Effects of fatty acid derivatives on the ignition quality and coldflow of diesel fuel // Journal of the American Oil Chemists' Society, 1995. – № 72. – P. 433-437.
15. Романцова С.В., Нагорнов С.А. Эфирная композиция для улучшения свойств дизельного топлива // Наука в центральной России. – 2013. – № 2. – С. 35-43.
16. Романцова С.В., Нагорнов С.А., Корнев А.Ю. Состав добавки для улучшения характеристик современного дизельного топлива // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2019. – № 3. – С. 547-556.
17. Смеси жирных кислот и их применение: патент 2483057 РФ: МПК7 C07C 53/00, C10L 1/188, C11C 3/00, C07C 69/22, C10L 1/02, C10L 1/19, C07C 69/52, C07C 67/02 / М.И. Кнут, П.Р. Битэм, К.А. Уолкер, Г.Ф.У. Гогэл – № 2009101866/04; заявл. 10.08.2010; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.

References

1. Nabi M.N., Rasul M.G., Anwar M. Energy, exergy, performance, emission and combustion characteristics of diesel engine using new series of non-edible biodiesels // Renewable energy, 2019, – V. 140. –P. 647-657.
2. Gafurov N.M., Khismatullin R.F. Preimushchestva biodizel'nogo topliva // Innovatsionnaya nauka, 2016. – № 5. – S. 72-74.
3. Varnakov D.V., Varnakov V.V., Varnakova Ye.A. Rezul'taty issledovaniy nizkotemperaturnykh svoystv i tsetanovogo chisla biodizel'nogo topliva // Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii, 2016. – № 2(34). – S. 168-173.
4. Plotnikov S.A., Buzikov SH.V., Tovstyka V.S., Cheremisinov P.N. Opredeleniye ekspluatatsionnykh pokazateley traktora "Belarus-922" pri rabote na smesevom toplive // Vestnik Mordovskogo universiteta, 2018. – Tom 28. – № 3. – S. 445-458.
5. Arevalo B., Facio B., Jimenez A. The Production of Biodiesel from Blended Commercial Oil in Mexico: A Comparative Study // Journal of the mexican chemical society, 2008. – V. 52. – № 2. R. 136-139.
6. Graboski M.S., McCormick R.L. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines // Progress in Energy and Combustion Science, 1998. – V. 24. – R. 125-164.
7. Ikilic C., Yucesu H. Investigation of the Effect of Sunflower Oil Methyl Ester on the performance of a Diesel Engine // Energy Sources, 2006. – V. 27. – № 13. – R. 1225-1234.
8. Kinoshita E., Hamasaki K., Jaqin C. Diesel Combustion of Single Compositions of Palm Oil Methyl Ester // SAE Technical Paper Series, 2003. – № 2003-01-1929. – R. 1-10. 9
9. Gafurov N.M., Khismatullin R.F. Faktory, vliyayushchiye na promyshlennoye proizvodstvo i primeneniye biodizel'nogo topliva // Innovatsionnaya nauka, 2016. – № 5. – S. 74-75.
10. 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. V. 140. – R. 274-280.
11. Didmanidze O.N., Varnakov D.V., Varnakov V.V., Karev A.M., Varnakova Ye.A., Platonov A.V. Rezul'taty opredeleniya optimal'nogo sootnosheniya komponentov biodizel'nogo topliva pri uslovii obespecheniya nizkotemperaturnykh svoystv i tsetanovogo chisla // Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya

«Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina», 2016. – № 5(75). – S. 30-35.

12. Knothe, G. Dependence of Biodiesel Fuel Properties on the Structure of Fatty Acid Alkyl Esters // Fuel Processing Technology, 2005. № 86. R. 1059-1070.

13. Azeez A.M., Fasakin A.O., Orege J.I. Production, Characterisation and Fatty Acid Composition of *Jatropha curcas* Biodiesel as a Viable Alternative to Conventional Diesel Fuel in Nigeria // Green and Sustainable Chemistry, 2019. – V.9. № 1. – P. 1-10

14. Stournas, S.; Lois, E.; Serdari, A. Effects of fatty acid derivatives on the ignition quality and coldflow of diesel fuel // Journal of the American Oil Chemists' Society, 1995. – № 72. – P. 433–437.

15. Romantsova S.V., Nagornov S.A. Efirnaya kompozitsiya dlya uluchsheniya svoystv dizel'nogo topliva // Nauka v tsentral'noy Rossii. – 2013. – № 2. – S. 35-43.

16. Romantsova S.V., Nagornov S.A., Kornev A.Yu. Sostav dobavki dlya uluchsheniya kharakteristik sovremennogo dizel'nogo topliva // Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya. – 2019. – № 3. – S. 547-556.

17. Smesi zhirnykh kislot i ikh primeneniye: patent 2483057 RF: MPK7 C07C 53/00, C10L 1/188, C11C 3/00, C07C 69/22, C10L 1/02, C10L 1/19, C07C 69/52, C07C 67/02 / M.I. Knut, P.R. Bitem, K.A. Uolker, G.F.U. Gogel – № 2009101866/04; zayavl. 10.08.2010; opubl. 27.05.2013, Byul. № 15

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Романцова Светлана Валерьевна – кандидат химических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный университет им Г.Р. Державина», Россия, г. Тамбов, e-mail: svromantsova@yandex.ru.

Нагорнов Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Корнев Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab7@yandex.ru.

Ликсутина Анна Павловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab7@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Romantsova Svetlana – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State University named after G.R. Derzhavin», Russia, Tambov, e-mail: svromantsova@yandex.ru

Kornev Aleksey – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Science of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab7@yandex.ru.

Nagornov Stanislav – Full Doctor of Technical sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Liksutina Anna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab7@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 18.09.2019 Принята к публикации (Accepted): 21.10.2019