

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.3.313-320>

УДК 620:97



Моделирование оптимального компонентного состава биодизельного топлива

© 2020. Д. В. Варнаков¹✉, С. А. Симачков², В. В. Варнаков¹

¹ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, Российская Федерация,

²ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

В статье приведены результаты исследования по определению компонентного состава биодизельного топлива на рапсовой основе, выполнено моделирование оптимального компонентного состава с учётом низкотемпературных свойств и цетанового числа. На основе проведенных исследований получены математические модели изменения низкотемпературных свойств биодизельного топлива в зависимости от процентного содержания рапсового масла, определено и обосновано оптимальное соотношение его компонентов. Испытания проводили в 2012-2019 гг. Изучаемые температурные пределы соответствуют крайним значениям температуры центрального и южного регионов Российской Федерации. Второй важной задачей являлось определение оптимального соотношения дизельного топлива и рапсового масла при обеспечении требований ГОСТ Р 52368-05 по цетановому числу биодизельного топлива. Исследования по определению оптимального процентного соотношения рапсового масла и дизельного топлива на цетановое число показали, что биодизельное топливо, в составе которого присутствует рапсовое масло в концентрации до 30 %, удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 52368-05 (ЕН 590:2009). В работе использовали сертифицированное оборудование, а методика соответствовала требованиям государственного стандарта на их проведение. Для решения задачи по определению оптимального соотношения компонентов биодизельного топлива была предложена методика оценки низкотемпературных свойств и цетанового числа, а также была проанализирована зарубежная научная литература по изучаемому вопросу. По результатам проведенных исследований были выдвинуты и подтверждены гипотезы об изменении низкотемпературных свойств и цетанового числа биодизельного топлива при увеличении в нем доли рапсового масла, а также возможности математического моделирования его оптимального компонентного состава, соответствующего температурным условиям окружающей среды при эксплуатации техники. Достоверность аппроксимации полученных зависимостей составила 0,83...0,91 при определении низкотемпературных свойств образцов биодизельного топлива в пределах заданных температур от -40 до 0 °С.

Ключевые слова: дизельное топливо, низкотемпературные свойства, цетановое число, рапсовое масло, альтернативные топлива, биотопливо, температура помутнения, температура кристаллизации, температура застывания.

Благодарности: работа выполнялась за счет собственных финансовых средств. Авторы выражают благодарность сотрудникам Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, испытательной лаборатории нефтепродуктов (г. Ижевск) за содействие в проведении исследований.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Варнаков Д. В., Симачков С. А., Варнаков В. В. Моделирование оптимального компонентного состава биодизельного топлива. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2020;21(3):313-320.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.3.313-320>

Поступила: 05.03.2020

Принята к публикации: 28.04.2020

Опубликована онлайн: 23.06.2020

Modeling of the optimal component composition of biodiesel fuel

© 2020. Dmitry V. Varnakov¹✉, Sergey A. Simachkov², Valery V. Varnakov¹

¹Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation,

²Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation

The article presents the results of study to determine the component composition of rape-based biodiesel. Modeling of the optimal component composition taking into account low-temperature properties and cetane number was carried out. According to the studies, mathematical models of changes in the low-temperature properties of biodiesel fuel depending on the percentage of rapeseed oil were obtained, the optimal ratio of its components was determined and justified. The tests were conducted

in 2012-2019. The studied temperature limits correspond to the extreme temperature values of the central and southern regions of the Russian Federation. The second important task was to determine the optimal ratio of diesel fuel and rapeseed oil while meeting the requirements of GOST R52368-05 for the cetane number of biodiesel fuel. Studies of the optimal percentage ratio of rapeseed oil and diesel fuel per cetane number showed that biodiesel, which contains rapeseed oil in a concentration of up to 30 %, meets the requirements of GOST R52368-05 (EN 590:2009). Certified equipment was used in the studies, and the methodology met the requirements of the state standard for their implementation. To solve the problem of determining the optimal ratio of biodiesel components, a methodology for assessing temperature and cetane number properties, as well as foreign scientific literature was analyzed in the field of research data. According to the results of the research, hypotheses were put forward that the low-temperature properties and cetane number of biodiesel fuel change with an increase in the proportion of rapeseed oil in it, as well as the possibility of mathematical modeling of its optimal component composition corresponding to environmental temperature conditions during operation of the equipment. The reliability of the approximation of the obtained dependences was 0.83...0.91 when studying the low-temperature properties of biodiesel samples within the specified temperatures from -40 to 0 °C.

Keywords: diesel fuel, low temperature properties, cetane number, rapeseed oil, alternative fuels, biofuels, cloud point, crystallization temperature, pour point

Acknowledgments: the research was carried out at the authors' own expense. The authors are grateful to the staff of the Ulyanovsk Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, testing laboratory of petroleum products (Izhevsk) for assistance in conducting research.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Varnakov D. V., Simakov S. A., Varnakov V. V. Modeling of the optimal component composition of biodiesel fuel. *Agrarnaya nauka Evro Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(3):313-320. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.3.313-320>

Received: 05.03.2020

Accepted for publication: 28.04.2020

Published online: 23.06.2020

В странах Западной Европы и Соединенных Штатах активно поддерживаются программы по использованию альтернативных видов топлива на автомобильном транспорте¹. Осуществляется это, главным образом, освобождением от налогообложения². Несмотря на подобную поддержку внедрения альтернативных видов топлива существует ряд причин, ограничивающих использование биотоплива на автомобильном транспорте. Одной из причин, которая ограничивает распространение биодизельного топлива, является его низкая стабильность в процессе хранения, т. е. ограничение сроков сохранения его качества. Не менее значимой проблемой является уменьшение температурных границ применения биотоплива, в частности биодизельного. Большое значение низкотемпературные свойства топлива имеют при эксплуатации техники в условиях низких температур, что напрямую связано с изменением его физико-химических свойств. При низких температурах протекают процессы непосредственного образования и разрастания кристаллического парафина, что приводит к засорению топливных элементов

и отказу всей топливной системы дизельного двигателя [1, 2, 3].

Способ получения биодизельного топлива заключается в непосредственном смешивании дизельного топлива с различными компонентами растительного происхождения. При применении биодизельного топлива на автомобильном транспорте дизельное топливо с различными компонентами, полученными на основе растительного сырья, смешивают в разном соотношении, что определяется физико-химическими, экологическими и энергетическими требованиями [4, 5, 6].

В случае необходимости увеличения сроков хранения биодизельного топлива используют метод повышения окислительной стабильности биотоплива, который предполагает добавление в его состав компонентов, противодействующих окислению³ [7].

Для улучшения свойств дизельного топлива, при использовании его в среде с низкой температурой, применяют способ, который основан на добавлении депрессорных присадок в его состав. Эти присадки препятствуют росту кристаллов парафина, а также формируют достаточно прочную кристаллическую

¹Информационный сайт Европейской Комиссии [Электронный ресурс].

Режим доступа: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/urban/studies/doc/2016-01-21-alternative-fuels-and-infrastructure-in-seven-non-eu-markets.pdf> (дата обращения 15.04.2020).

²Информационно-аналитическое агентство Cleandex. [Электронный ресурс].

Режим доступа: <http://www.cleandex.ru/articles/2008/07/08/biofuels-europe> (дата обращения 15.04.2020).

³Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года № ВП-П8-2322 (Программа «БИО-2020», утверждена Председателем Правительства Российской Федерации В. В. Путиным 24 апреля 2012 года за № 1853п-П8 [Электронный ресурс]. М., 2013.

Режим доступа: <http://biotech2030.ru/platforma/strategii-2/bio2020/>

решетку, что позволяет снизить предельную температуру фильтрации и температуру застывания топлива. Данные свойства биодизельного топлива зависят не только от наличия присадок в своем составе, но также и от доли компонентов растительного происхождения вследствие того, что предельная температура фильтрации этих компонентов выше, чем у дизельного топлива. Для применения биодизельного топлива при температурах ниже 0 °С важным условием является определение температур эксплуатационного предела для конкретного компонентного состава при условии соблюдения требований ГОСТ Р52368-05 [8, 9, 10, 11].

Таким образом, установление оптимального соотношения компонентов биодизельного топлива с учетом его эксплуатационных свойств, проявляющихся при низкой температуре, а также составление дифференциальных уравнений, которые позволяют определить оптимальный компонентный состав для работы в определенной климатической зоне, является актуальной и важной задачей [12, 13, 14].

Цель работы – разработать методику определения оптимального компонентного состава биодизельного топлива и получить математические зависимости наилучшего соотношения компонентов, удовлетворяющие температурным условиям применения топлива.

Материал и методы. На этапе планирования эксперимента необходимо учесть, что разница между максимальными и минимальными температурами в регионах, где предусмотрено применение летнего и зимнего видов дизельного топлива по ГОСТ Р52368-05 равна 70 °С. При этом также учитывали, что в некоторых регионах Российской Федерации преобладающую часть года температура ниже 0 °С. Поэтому при проведении исследований эксплуатационных свойств биодизельного топлива при низких температурах необходимо получить дифференциальные зависимости, которые позволяют установить приемлемую пропорцию компонентов дизельного топлива, обеспечивающую надежную работу двигателя при температуре окружающей среды ниже 0 °С.

Испытания проводили в Ульяновском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН в 2012-2019 гг. В исследовании использовали биодизельное топливо, состоящее из зимнего дизельного топлива и рапсового масла. Было подготовлено 11 образцов, из которых 9 проб составляло биодизельное топливо с различным содержанием компонентов (содержание дизельного

топлива меняли пропорционально, начиная с 10 % и до 90 % включительно); 1 проба – только дизельное топливо; 1 проба – только рапсовое масло.

При исследовании проб использовали анализатор низкотемпературных свойств нефти и нефтепродуктов «ИРЭН 2.3», который позволяет быстро определить температуры помутнения, начала кристаллизации и застывания различных видов нефтепродуктов [14].

Температуру помутнения в данном приборе определяли путем фиксирования изменений оптического сигнала, проходящего через топливо, находящегося внутри специальной емкости в охлажденном состоянии. Также данный прибор, путем фиксирования изменений амплитуды колебаний зонда вибрации, расположенного в специальной емкости, способен определять температуру кристаллизации и застывания пробы. Следует отметить, что используемый прибор соответствовал по характеристикам лучшим мировым аналогам. Применение автономной системы охлаждения, основанной на термических и электрических принципах воздействия, а также реализация регистрации исследуемых параметров по оптическому и вибрационному способам, обеспечивает данному прибору высокую точность измерения.

Также необходимо учесть важность такого эксплуатационного параметра, как цетановое число, которая обусловлена его универсальной значимостью для любого вида дизельного топлива и состоит в определении периода задержки воспламенения топливной смеси. Исследования по нахождению цетанового числа биодизельного топлива в зависимости от соотношения его компонентов проводили на установке ИДТ-90. Всего изучали три образца биодизельного топлива с содержанием в них рапсового масла в диапазоне от 10 до 30 % включительно.

Установка, на которой происходили исследования, представляет собой четырехтактный предкамерный двигатель внутреннего сгорания с переменной степенью сжатия, имеющий один цилиндр, где рабочим телом является поршень. Установка была оснащена системой контроля и измерительной аппаратурой. Используемая аппаратура представляет собой систему, состоящую из бесконтактных датчиков впрыска и воспламенения топлива, что позволяет определять цетановое число в диапазоне от 20 до 80 единиц включительно.

Исследование биодизельного топлива проводили по методу «совпадения вспышек».

Выбор данного метода заключается в его соответствии ГОСТ 3122-67. В качестве регистратора исследуемых параметров был применен индикатор периода задержки воспламенения (ИПЗВ-2). Датчик имеет двухшкальную систему отсчета, что позволяет одновременно реагировать как на период задержки воспламенения смеси, так и момент впрыска. Имея вышеупомянутое преимущество, данный прибор позволяет отследить необходимую степень сжатия и угол впрыска. Также контролировали время задержки топливного самовоспламенения по отношению к началу топливного впрыска.

Метод «совпадения вспышек» основан на сравнении воспламеняемости топлив. Данную характеристику биодизельного топлива сравнивали с подобной характеристикой, присутствующей эталонным жидкостям с известными показателями цетанового числа. Также стоит отметить и одинаковость условий при проведении экспериментов для достижения точности полученных данных.

Результаты и их обсуждение. В процессе исследования эксплуатационных свойств

биодизельного топлива при низких температурах проводили 3 анализа каждой пробы с определением среднего арифметического. Для отбора нормируемого количества исследуемого топлива применяли лабораторный шприц с насадками, которые меняли при каждом новом исследовании. В каждом эксперименте 0,2 мл топлива помещали в специальную емкость, оснащенную зондом вибрации. При этом исследуемый объем герметизировали во избежание воздействия окружающей среды.

Прежде чем приступить к исследованиям, прибор откалибровали. Процесс охлаждения пробы запускали лишь после приведения ее к температуре 20 °С. Пробы охлаждали до температуры -53 °С. После охлаждения в специальной емкости пробу топлива подвергали последовательному нагреванию до температуры 20 °С. Измеряемые параметры в процессе исследований интенсивностью восемь раз в секунду отображались на дисплее прибора. Данные, полученные в ходе эксперимента, представлены в таблице.

Таблица – Результаты определения низкотемпературных свойств биодизельного топлива / Table 1 – The results of determining the low temperature properties of biodiesel

Про-ба / Test	Исследуемый параметр / The studied parameter	Содержание рапсового масла в дизельном топливе, % / The content of rapeseed oil in diesel fuel, %											
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
№1	Температура, °С / Temperature, °С:												
	помутнения / cloud point	-24,5	-24,5	-21,3	-19,2	-21,8	-19,2	-19,7	-17,5	-16,5	-15,4	-14,9	
	начала кристаллизации / crystallization onset temperature	-27,0	-30,8	-27,0	-27,0	-26,4	-28,6	-25,3	-22,9	-20,2	-19,7	-20,8	
	замерзания / pour point	-35,2	-34,1	-30,2	-29,1	-29,7	-31,3	-27,5	-27,0	-24,0	-22,9	-38,0	
№2	Температура, °С / Temperature, °С:												
	помутнения / cloud point	-24,5	-24,5	-20,8	-19,7	-22,4	-21,8	-19,2	-17,0	-17,0	-15,4	-14,4	
	начала кристаллизации / crystallization onset temperature	-27,0	-30,2	-27,0	-27,0	-26,4	-28,6	-25,9	-22,9	-20,8	-20,2	-20,8	
	замерзания / pour point	-35,8	-34,1	-29,7	-29,1	-30,2	-31,9	-27,5	-25,3	-23,5	-24,5	-37,4	
№3	Температура, °С / Temperature, °С:												
	помутнения / cloud point	-24,5	-23,5	-21,8	-19,7	-21,8	-21,3	-19,2	-17,5	-16,5	-15,9	-13,8	
	начала кристаллизации / crystallization onset temperature	-27,0	-29,7	-28,6	-27,0	-25,9	-29,7	-25,3	-22,9	-20,2	-19,7	-20,8	
	замерзания / pour point	-35,2	-32,4	-31,3	-29,1	-31,3	-30,8	-27,5	-25,9	-24,0	-23,5	-36,9	

По данным таблицы видно, что понижение температуры топлива прямо пропорционально его вязкости. Для чистого зимнего дизельного топлива прослеживается резкое снижение вязкости при достижении температуры -27°C . Это согласуется с паспортными данными данного топлива. При достижении же топливной емкостью температуры $-24,5^{\circ}\text{C}$ – отмечалось значительное снижение уровня сигнала от оптического модуля, что свиде-

тельствовало о достижении температуры помутнения данного топлива.

На основании проведенных исследований были определены зависимости низкотемпературных эксплуатационных свойств биодизельного топлива на основе рапса от компонентов, входящих в его состав. Зависимости параметров биодизельного топлива с рапсовым маслом, определяющих его низкотемпературные свойства, представлены в виде полиномов (рис. 1).

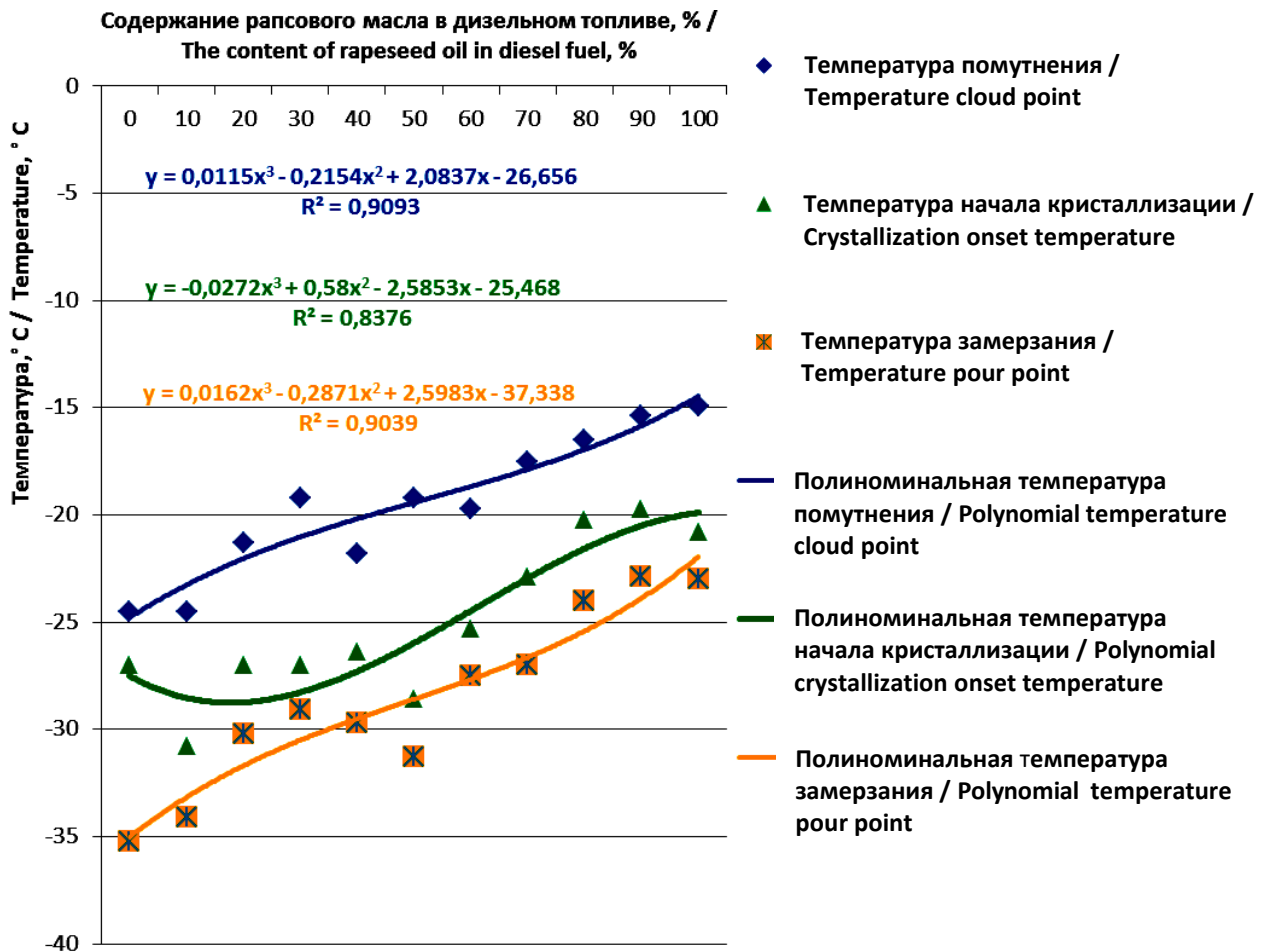


Рис. 1. Полиномиальная аппроксимация температур помутнения, начала кристаллизации и застывания биодизельного топлива от содержания в нем рапсового масла, °C /

Fig. 1. Polynomial approximation of the cloud point, the onset of crystallization and solidification of biodiesel from the content of rapeseed oil, °C

Проанализировав рисунок 1, можно сделать вывод о наличии некой закономерности: при увеличении процентного соотношения рапсового масла в биодизельном топливе температуры его помутнения, начала кристаллизации и застывания также повышаются.

По результатам проведенных исследований проб по представленной методике были получены уравнения, позволяющие осуществить моделирование оптимального компонент-

ного состава биодизельного топлива в зависимости от температуры окружающей среды.

Температура помутнения

$$y = 0,0115x^3 - 0,2154x^2 + 2,0837x - 26,656, \quad (1)$$

где x – процентное содержание рапсового масла в дизельном топливе.

Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9093$.

Температура начала кристаллизации

$$y = -0,0272x^3 + 0,58x^2 - 2,5853x - 25,468. \quad (2)$$

Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,8376$.

Температура замерзания

$$y = 0,0162x^3 - 0,2871x^2 + 2,5983x - 37,338. \quad (3)$$

Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9039$.

Исследования показали, что увеличение содержания рапсового масла в биодизельном топливе приводит к ухудшению его эксплуатационных свойств при отрицательной температуре. Однако приемлемые эксплуатационные свойства моторного топлива можно обеспечить путем контроля за содержанием масла растительного происхождения (в нашем случае рапсового) в дизельном топливе, которое не должно превышать 30 %.

После проведения эксперимента на основании полученных результатов была полу-

чена зависимость цетанового числа от содержания рапсового масла в составе биодизельного топлива. Исследования оптимального процентного соотношения рапсового масла и дизельного топлива на цетановое число проводили в испытательной лаборатории нефтепродуктов (г. Ижевск), аккредитованной Госстандартом России на техническую компетентность и независимость.

На одноцилиндровой установке для определения цетановых чисел дизельных топлив ИДТ-90 проводили исследования трех проб с содержанием рапсового масла 10 %, 20 % и 30 %. Диапазон определения цетановых чисел – от 20 до 80 (рис. 2).

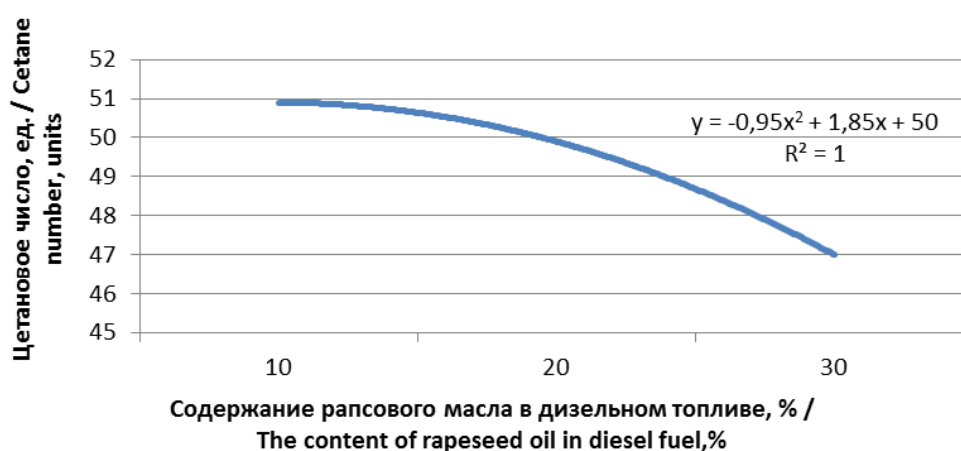


Рис. 2. Полиномиальная аппроксимация цетанового числа биодизельного топлива в зависимости от содержания в нем рапсового масла /

Fig 2. Polynomial approximation of the cetane number of biodiesel depending on the content of rapeseed oil

Результаты, полученные в ходе исследований цетанового числа биодизельного топлива при применении рапса в качестве его компонента, представлены в виде аппроксимирующей функции

$$y = -0,95x^2 + 1,85x + 50. \quad (4)$$

Достоверность аппроксимации $R^2 = 1$.

Полученная закономерность свидетельствует о том, что при увеличении в биодизельном топливе процентного содержания рапсового масла в диапазоне от 10 до 30 % цетановое число уменьшается с 50,9 до 47,0 непосредственно. На основании требований ГОСТа Р52368-05 (ЕН 590:2009) к цетановому числу дизельного топлива необходимо, чтобы оно превышало 46 единиц. Это число было обеспечено в процессе проведения эксперимента. Увеличение же концентрации рапсового масла в составе биодизельного топлива свыше 30 % объективно приводит к ухудшению его эксплуатационных свойств, что негативно влияет на работу двигателя в целом. В качестве субъ-

ективных моментов повышения концентрации рапсового масла можно выделить такие негативные тенденции, как снижение полноты сгорания топлива, повышение его расхода, а также повышение дымности отработанных газов.

В ходе проводимых исследований были выдвинуты гипотезы об ухудшении низкотемпературных свойств биодизельного топлива при увеличении в нем доли рапсового масла, а также возможности математического моделирования его оптимального компонентного состава, соответствующего погодным условиям при эксплуатации техники. Полученные результаты эксперимента подтвердили обе выдвинутые гипотезы и не противоречат результатам схожих исследований.

Предложенная методика моделирования оптимального компонентного состава биодизельного топлива в зависимости от температуры окружающей среды и результаты оценки его низкотемпературных свойств могут быть использованы при разработке технических устройств смешивания компонентов.

Выводы.

1. Разработана методика определения оптимального компонентного состава биодизельного топлива и получены математические зависимости наилучшего соотношения компонентов, удовлетворяющие температурным условиям применения топлива. Экспериментально установлено, что требуемые эксплуатационные свойства биодизельного топлива, применяемого в центральном и южном регионах России, при низких температурах обеспечиваются только при концентрации рапсового

масла в биодизельном топливе, не превышающей 30 %.

2. Цетановое число биодизельного топлива, в составе которого присутствует рапсовое масло в концентрации до 30 %, удовлетворяет требованиям ГОСТа Р52368-05 (ЕН 590:2009).

3. Полученные математические зависимости позволяют определить основные параметры биодизельного топлива с различным соотношением его компонентов при использовании при температуре окружающей среды $-40...0^{\circ}\text{C}$ с достоверностью аппроксимации 0,83...0,91.

Список литературы

1. Шиперова Т. П., Пушин В. А. Биотопливо и его практическое применение. Автотранспортное предприятие. 2009;(3):16-18.
2. Дидманидзе О. Н., Карев А. М., Митягин Г. Е. О перспективах развития автомобильного транспорта в агропромышленном комплексе. Международный научный журнал. 2016;(1):53-65. Режим доступа: <http://www.tis-journal.com/contents/2016/vypusk-no1/#c10114>
3. Марков В. А., Иващенко Н. А., Девянин С. Н., Нагорнов С. А. Использование биотоплив на основе растительных масел в дизельных двигателях: Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. 2012;10(10):74-81. DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-10-391>
4. Федченко И. А., Соловцова А. С., Лукьянов А. Н. Основные тенденции развития рынка биотоплива в мире и России за период 2000–2012 годы: аналитический отчет ОАО «Корпорации «Развитие» г. Белгород [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo_ru_2.pdf (дата обращения 15.04.2020).
5. Ингендо Аксель (DE), Ротер Кристиан (DE), Хайзе Клаус-Петер (DE). Применение 2,6-ДИ-ТРЕТ-БУТИЛГИДРОКСИТОЛУОЛА для повышения окислительной стабильности при хранении: патент № 2340655 (Российская Федерация). 2008. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2340655>
6. Девянин С. Н., Улюкина Е. А., Пуляев Н. Н. Исследование стабильности биотоплива на основе растительных масел. Вестник ФГОУ ВПО МГАУ имени В. П. Горячкина. 2012;(5 (56)):19-21. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20258746>
7. Доржеев А. А., Кайзер О. А. Экологичность дизелей при использовании биотоплива на основе рапсового масла. Проблемы современной аграрной науки: сб. мат-лов Международной заочной научн. конф. Красноярск: Красноярский ГАУ, 2017. С. 37-39. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30697077>
8. Варнаков В. В., Варнаков Д. В., Платонов А. В. Устройство оперативного контроля качества биотоплива: пат. № 2471186 (Российская Федерация). №2011139934/15: заявл. 30.09.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36. 5 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2471186&TypeFile=html
9. Варнаков В. В., Варнаков Д. В., Платонов А. В., Варнакова Е. А. Устройство контроля низкотемпературных свойств дизельных и биодизельных топлив с системой подогрева: патент на полезную модель 147779 (Российская Федерация). № 2014129446/28; заявл. 16.07.2014; опубл. 20.11.2014. Бюл. № 32. 2 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&rn=3339&DocNumber=147779&TypeFile=html
10. Варнаков В. В., Варнаков Д. В., Платонов А. В. Способ и система оценки стабильности качества биотоплива для дизельных двигателей. Международный научный журнал. 2013;(3):95-101.
11. Dale B., Huber D. The Fuel of the Future Is Grassoline. Scientific American 2009;(9):26-33. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/the-fuel-of-the-future-is-grassoline>
12. Senthil K. M., Ramesh A., Nagalingam B. Experimental investigations on a jatropha oil methanol dual fuel engine. SAE Technical Paper Series. 2001;0153:1-7. DOI: <https://doi.org/10.4271/2001-01-0153>
13. Измайлов А. Ю., Дидманидзе О. Н., Митягин Г. Е., Карев А. М. Ресурсосбережение на автомобильном транспорте. М.: ООО «УМЦ «Триада», 2016. 84 с.
14. 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)):168-173. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26367447>

References

1. Shiperova T. P., Pushchin V. A. *Bioplivno i ego prakticheskoe primenenie*. [Biofuel and its practical application. Motor transport company]. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2009;(3):16-18. (In Russ.).
2. Didmanidze O. N., Karev A. M., Mityagin G. E. *O perspektivakh razvitiya avtomobil'nogo transporta v agropromyshlennom komplekse*. [About prospects of development of the automobile transport in agro-industrial complex]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal = The International Scientific Journal*. 2016;(1):53-65. (In Russ.). URL: <http://www.tis-journal.com/contents/2016/vypusk-no1/#c10114>
3. Markov V. A., Ivashchenko N. A., Devyanin S. N., Nagornov S. A. *Ispol'zovanie biotopliv na osnove rastitel'nykh masel v dizel'nykh dvigatelyakh*. [Use of vegetable oils based biofuels in diesel engines]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana*. 2012;10(10):74-81. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-10-391>

4. Fedchenko I. A., Solovtsova A. S., Luk'yanov A. N. *Osnovnye tendentsii razvitiya rynka biotopliva v mire i Rossii za period 2000–2012 gody: analiticheskiy otchet OAO «Korporatsii «Razvitie» g. Belgorod.* [The main trends in the development of the biofuel market in the world and in Russia for the period 2000–2012: analytic report of JSC «Corporation «Razvitie», Belgorod]. Available at: http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo_ru_2.pdf (accessed 15.04.2020).

5. Ingendo Aksel' (DE), Roter Kristian (DE), Khayze Klaus-Peter (DE). The use of 2,6-DI-TRET-BUTYL HYDROXYTOLUOL to increase oxidative stability during storage: patent Russian Federation no. 2340655. 2008. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2340655>

6. Devyanin S. N., Ulyukina E. A., Pulyaev N. N. *Issledovanie stabil'nosti biotopliva na osnove rastitel'nykh masel.* [A stability study of biofuels from vegetable oils]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V. P. Goryachkina»* = Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education «Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin». 2012;(5 (56)):19-21. (In Russ.).

URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20258746>

7. Dorzheev A. A., Kayzer O. A. *Ekologichnost' dizeley pri ispol'zovanii biotopliva na osnove rapsovoogo masla.* [Environmentally friendly diesel engines in the use of biofuel based on rapeseed oil]. *Problemy sovremennoy agrarnoy nauki: sb. mat-lov Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchn. konf.* [Problems of modern agricultural science : Collection of proceedings of the International correspondence scientific conference]. Krasnoyarsk: *Krasnoyarskiy GAU*, 2017. pp. 37-39. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30697077>

8. Varnakov V. V., Varnakov D. V., Platonov A. V. Device for operational quality control of biofuel: patent Russian Federation no. 2471186. 2012.

URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2471186&TypeFile=html

9. Varnakov V. V., Varnakov D. V., Platonov A. V., Varnakova E. A. Control device for low-temperature properties of diesel and biodiesel fuels with a heating system: patent for utility model: Russian Federation no. 147779. 2014. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&rn=3339&DocNumber=147779&TypeFile=html

10. Varnakov V. V., Varnakov D. V., Platonov A. V. *Sposob i sistema otsenki stabil'nosti kachestva biotopliva dlya dizel'nykh dvigateley.* [Method and system for estimating stability of the quality of biofuels for diesel engines]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal* = The International Scientific Journal. 2013;(3):95–101. (In Russ.).

11. Dale B., Huber D. The Fuel of the Future Is Grassoline. *Scientific American* 2009;(9):26-33.

URL: <https://www.scientificamerican.com/article/the-fuel-of-the-future-is-grassoline>

12. Senthil K. M., Ramesh A., Nagalingam B. Experimental investigations on a jatropha oil methanol dual fuel engine. *SAE Technical Paper Series*. 2001;0153:1-7. DOI: <https://doi.org/10.4271/2001-01-0153>

13. Izmaylov A. Yu., Didmanidze O. N., Mityagin G. E., Karev A. M. *Resursosberezhenie na avtomobil'nom transporte.* [Resource saving in road transport]. Moscow: *ООО «UMTs «Triada»*, 2016. 84 p.

14. Varnakov D. V., Varnakov V. V., Varnakova E. A. *Rezultaty is-sledovaniy nizkotemperaturnykh svoystv i tsetanovogo chisla biodizel'nogo topliva.* [Results of studies of low temperature properties and cetane number of bio-diesel]. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2016;(2(34)):168-173. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26367447>

Сведения об авторах

✉ **Варнаков Дмитрий Валерьевич**, доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры «Техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», ул. Льва Толстого, д. 42, г. Ульяновск, Российская Федерация, 432017, e-mail: contact@ulsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7337-974X>, e-mail: varndm@mail.ru

Симачков Сергей Александрович, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина (национальный исследовательский университет)», пр-кт Ленинский, д. 65, корпус 1, г. Москва, Российская Федерация, 119991, e-mail: com@gubkin.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7098-758X>, e-mail: simahkov1969@mail.ru

Варнаков Валерий Валентинович, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», ул. Льва Толстого, д. 42, г. Ульяновск, Российская Федерация, 432017, e-mail: contact@ulsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1320-9466>, e-mail: varnval@mail.ru

Information about the authors

✉ **Dmitry V. Varnakov**, DSc. of Technical science, associate professor, professor at the Department of Technosphere Safety, Ulyanovsk State University, Lev Tolstoy Str., 42, Ulyanovsk, Russian Federation, 432017, e-mail: contact@ulsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7337-974X>, e-mail: varndm@mail.ru

Sergey A. Simachkov, senior lecturer, I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninsky Prospect, 65, Building 1, Moscow, Russian Federation, 119991, e-mail: com@gubkin.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7098-758X>, e-mail: simahkov1969@mail.ru

Valery V. Varnakov, DSc. of Technical science, professor, Head of the Department of Technosphere Safety, Ulyanovsk State University, Lev Tolstoy Str., 42, Ulyanovsk, Russian Federation, 432017, e-mail: contact@ulsu.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1320-9466>, e-mail: varnval@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author