

Исследование биодизельного топлива с добавками пальмового масла и перекиси водорода

Петр Платонович Ощепков¹,
кандидат технических наук, доцент;
Иван Александрович Заев²,
кандидат физико-математических наук,
e-mail: i_zaev@mail.ru;

Сергей Владимирович Смирнов¹,
кандидат технических наук, доцент;
Антон Владиславович Бижаев³,
кандидат технических наук, ассистент

¹Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация;

²ООО «Кинтех Лаб», Москва, Российская Федерация;

³Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Пальмовое масло по теплоте сгорания, стехиометрическому соотношению, цетановому числу наиболее близко к традиционному дизельному топливу. Однако повышенные кинематическая вязкость, температура застывания затрудняют его применение в чистом виде в дизельных двигателях. (*Цель исследования*) Изучить особенности горения: дизельного топлива с различными добавками пальмового масла (биодизельного топлива); чистого 100-процентного пальмового масла; биодизельного топлива с различными добавками пальмового масла и перекиси водорода, а также разработать метод управления процессом его горения. (*Материалы и методы*) Для определения времени задержки воспламенения выбрали методику кинетического моделирования процесса самовоспламенения биодизельного топлива в воздухе. Моделирование процесса самовоспламенения проводили в программном комплексе Chemical Workbench. В расчетах использовали модель адиабатической калориметрической бомбы. Для описания процесса самовоспламенения использовали универсальный кинетический механизм, который был верифицирован для расчета самовоспламенения суррогатов дизельного, биодизельного топлива, образования токсичных веществ и сажи в процессах горения. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что добавки пальмового масла к дизельному топливу увеличивают задержку его самовоспламенения, особенно в области низких и средних температур – 750-950 кельвинов. Определили, что при добавке до 10 процентов пальмового масла время задержки воспламенения биодизельного топлива практически не отличается от показателя дизельного топлива – не более 5 процентов. Повышение добавки пальмового масла до 30 процентов и более заметно увеличивает задержку воспламенения топлива. При использовании в качестве топлива только пальмового масла задержка воспламенения в диапазоне температур 800-950 кельвинов возрастает в 2 раза. Рассчитали для каждого состава биодизельного топлива с различными добавками пальмового масла оптимальное количество перекиси водорода. (*Выводы*) Показали, как с помощью добавок перекиси водорода можно влиять на реакционную способность биодизельного топлива и тем самым регулировать время задержки его воспламенения.

Ключевые слова: пальмовое масло, альтернативные виды топлива, биотопливо, биодизельное топливо, время задержки воспламенения, добавки перекиси водорода, дизель.

■ **Для цитирования:** Ощепков П.П., Заев И.А., Смирнов С.В., Бижаев А.В. Исследование биодизельного топлива с добавками пальмового масла и перекиси водорода // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №3. С. 48-53. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53.

Study of Biodiesel Fuel with Palm Oil and Hydrogen Peroxide Additives

Petr P. Oshchepkov¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor;
Ivan A. Zaev²,
Ph.D.(Phys-Math.), e-mail: i_zaev@mail.ru;

Sergey V. Smirnov¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor;
Anton V. Bizhaev³,
Ph.D.(Eng.), assistant professor

¹Russian University of Peoples' Friendship, Moscow, Russian Federation;

²Kintech Lab LLC, Moscow, Russian Federation;

³Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation



Abstract. Palm oil is comparable to traditional diesel fuel in terms of calorific value, stoichiometric ratio, and cetane number. However, its increased kinematic viscosity and pour point make it difficult to use in pure form in diesel engines. (*Research purpose*) To study specific features of burning: diesel fuel with various additives of palm oil (biodiesel fuel); pure 100-percent palm oil; biodiesel fuel with various additives of palm oil and hydrogen peroxide, as well as to develop a method to control its combustion process. (*Materials and methods*) To determine the ignition time lag, the authors chose a method of kinetic modeling of self-ignition of biodiesel fuel in the air. The self-ignition process was simulated using the Chemical Workbench software package. An adiabatic calorimetric bomb model was used to perform calculations. To describe the process of self-ignition, a universal kinetic mechanism was used, which was verified to calculate self-ignition of diesel and biodiesel fuel surrogates, as well as the formation of toxic substances and soot in the combustion processes. (*Results and discussion*) It is shown that adding palm oil to diesel fuel increases its ignition time lag, especially at low and medium temperatures of 750-950 kelvin. It was determined that with addition of 10 percent palm oil, the ignition time lag of biodiesel fuel is almost the same as that of diesel fuel - no more than 5 percent. Increasing the amount of palm oil additive up to 30 percent and more significantly increases the ignition time lag of the fuel. When using only palm oil as a fuel, the ignition time lag in the temperature range of 800-950 kelvin increases in two times. The study determined the optimal amount of hydrogen peroxide to be used for each composition of biodiesel fuel with various additives of palm oil. (*Conclusions*) It is shown that additives of hydrogen peroxide can influence the reactivity of biodiesel fuel and thereby regulate its ignition time lag.

Keywords: palm oil, alternative fuels, biofuel, biodiesel fuel, ignition time lag, hydrogen peroxide additives, diesel.

For citation: Oshchepkov P.P., Zaev I.A., Smirnov S.V., Bizhaev A.V. Issledovanie biodizel'nogo topliva s dobavkami pal'movogo masla i perekisi vodoroda [Study of biodiesel fuel with palm oil and hydrogen peroxide additives]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N3. 48-53 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53.

Потребление топлива транспортом определяет мировой спрос на нефть и жидкие биотоплива (более 55%) [1]. Со временем запасы углеводородов сокращаются, поэтому во многих странах мира проводят исследования по поиску альтернативных видов топлива для двигателей внутреннего сгорания. К 2040 г. альтернативное топливо в транспортном секторе будет достигать 20% общего объема спроса на энергию [2, 3].

Наиболее распространены два типа биотоплива – этанол и биодизельное топливо [4].

Развивающиеся страны, такие как Малайзия, Индонезия, Таиланд, Нигерия, активно поддерживают тенденцию производства биотоплива из внутренних возобновляемых ресурсов.

Нигерия входит в ТОП-10 стран-производителей пальмового масла. Автомобильный транспорт в этой стране осуществляет большую часть грузовых и пассажирских перевозок, а в сельском хозяйстве занято 65% населения [5]. По данным *The Global Petroleum Club* и других источников, среди растений наибольший выход масла с гектара характерен для масличной пальмы [6, 7].

При использовании пальмового масла в качестве добавки к основному виду топлива в транспортном секторе сельского хозяйства Нигерии можно существенно уменьшить потребление дизельного топлива, сократить транспортные издержки на перевозку нефтепродуктов и снизить токсичность отработанных газов дизельных транспортных средств, используемых в аграрных районах страны [2, 3, 8].

Мировые лидеры по производству пальмового мас-

ла – Индонезия и Малайзия. В связи с актуальностью вопроса проводят научные исследования по использованию пальмового масла в качестве альтернативного топлива для дизельных двигателей [7, 8].

Сравнение физико-химических свойств растительных масел показывает, что пальмовое масло по теплоте сгорания, стехиометрическому соотношению, цетановому числу наиболее близко к традиционному дизельному топливу [9-11]. Однако повышенные кинематическая вязкость, температура застывания затрудняют его применение в чистом виде в дизельных двигателях без внесения изменений в конструкцию двигателя и топливной аппаратуры.

Необходимо провести исследования характеристик биодизельного топлива, представляющего собой смесь дизельного топлива и пальмового масла, при работе на котором не требуется вносить существенные изменения в конструкцию двигателя. Процесс горения топлива во многом определяют мощностные и экономические показатели работы двигателя.

Цель исследования – изучить особенности горения: дизельного топлива с различными добавками пальмового масла (биодизельного топлива); чистого 100% пальмового масла; биодизельного топлива с различными добавками пальмового масла и перекиси водорода, а также разработать метод управления процессом его горения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для теоретической оценки параметров работы двигателя провели расчетные исследования параметров процесса горения исследуемых топлив.

Выделяют два процесса, зависящие от реакцион-

ной способности топлива: момент самовоспламенения топливовоздушной смеси и процесс распространения ламинарного пламени. Первый из них определяется кинетикой самовоспламенения топлива, второй – конструктивными и другими параметрами организации рабочего процесса (мелкость распыливания топлива, форма камеры сгорания в поршне, степень закрутки потока). При сохранении конструктивных параметров дизельного двигателя наибольший интерес представляет регулирование стадии самовоспламенения горючей смеси для обеспечения оптимальных условий воспламенения и последующего сгорания топлива.

Исследовали влияние состава биодизельного топлива (дизельное топливо + пальмовое масло) на характеристики его воспламенения в условиях работы дизельного двигателя, а также оценили возможность повышения его реакционной способности с помощью добавок к нему перекиси водорода.

О склонности дизельного топлива к самовоспламенению судят по цетановому числу. Процесс самовоспламенения топливо-воздушной смеси характеризуется временем задержки воспламенения. Именно по этому параметру можно оценить эффективность использования пальмового масла в дизельных двигателях без их существенной модификации.

Для определения времени задержки воспламенения выбрали методику кинетического моделирования процесса самовоспламенения биодизельного топлива в воздухе.

Реальное дизельное топливо представляет собой смесь сотен углеводородов, моделирование самовоспламенения которой затруднено из-за отсутствия данных о химических реакциях всех возможных углеводородов. Реальное дизельное топливо заменяют суррогатом – н-гептаном. Н-гептан имеет цетановое число, близкое к дизельному топливу, то есть демонстрирует подобные характеристики самовоспламенения. Ранее н-гептан использовали в качестве компонента суррогата дизельного топлива. Далее будем называть его дизельным топливом (ДТ) [12].

Биотопливо представляет собой результат этерификации растительных масел. В случае пальмового масла основными компонентами будут метил-эфиры пальмовой и олеиновой кислот [13]. Эквимолярная смесь метил-эфира пальмовой и олеиновой кислот используется в качестве суррогата пальмового масла (ПМ).

При кинетическом моделировании процесса самовоспламенения биодизельного топлива приняли следующие условия для момента впрыска и самовоспламенения топлива в дизельном двигателе:

- стехиометрическая топливо-воздушная смесь (самовоспламенение впервые происходит именно в зоне, где коэффициент избытка воздуха равен 1);
- диапазон начальных температур, характерных для температуры сжатого воздуха вблизи верхней

мертвой точки, – 700-1100 К;

- давление 40 бар;
- состав биодизельного топлива определяется массовой долей пальмового масла y , которая может изменяться в диапазоне от 0% (чистое ДТ) до 100% (чистое ПМ);
- в теоретических расчетах массовая доля перекиси водорода изменяется от 0 до 93% (от 0 до 930 г H_2O_2 на 1 кг топлива).

Моделирование процесса самовоспламенения проводили в программном комплексе *Chemical Workbench*, в расчетах использовали модель адиабатической калориметрической бомбы [14].

Для описания процесса самовоспламенения использовали универсальный кинетический механизм, который был верифицирован для расчета самовоспламенения суррогатов дизельного, биодизельного топлива, образования токсичных веществ и сажи в процессах горения [12, 15, 16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Рассчитали время задержки воспламенения от начальной температуры смесового топлива $(100 - y)\%$ ДТ + $y\%$ ПМ в воздухе для коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1$ (рис. 1). Добавки ПМ к ДТ увеличивают задержку самовоспламенения топлива в воздухе. Наиболее существенно увеличение в области низких и средних температур – 750-950 К. Именно при данных температурах происходит самовоспламенения топлива в дизеле вблизи верхней мертвой точки.

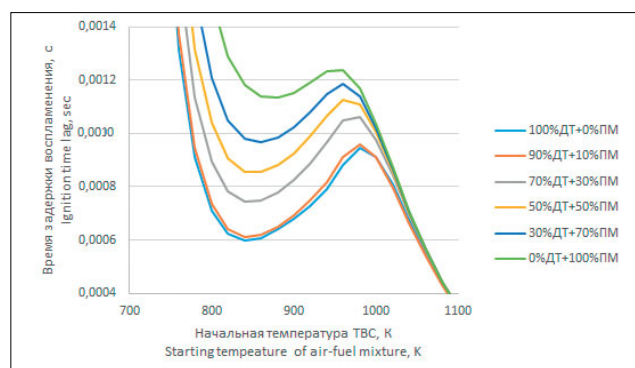


Рис. 1. Время задержки воспламенения топлива в зависимости от начальной температуры топливо-воздушной смеси

Fig. 1. Ignition time lag of fuel depending on the initial temperature of the fuel-air mixture ДТ – diesel fuel; ПМ – palm oil

При добавке до 10% ПМ время задержки воспламенения биодизельного топлива практически не отличается от показателя дизельного топлива – не более 5%. Повышение добавки ПМ до 30% и более заметно увеличивает задержку воспламенения топлива. При использовании в качестве топлива только пальмового масла задержка воспламенения в диапазоне температур 800-950 К возрастает в 2 раза.

Для исследования возможности повышения реакционной способности биодизельного топлива провели серию расчетов времени задержки воспламенения чистого ДТ, а также для биодизельных топлив «добавка ПМ 30» (70% ДТ + 30% ПМ) и «добавка ПМ 70» (30% ДТ + 70% ПМ) в сочетании перекисью водорода H_2O_2 от 0 до 13% по массе (рис. 2, 3).

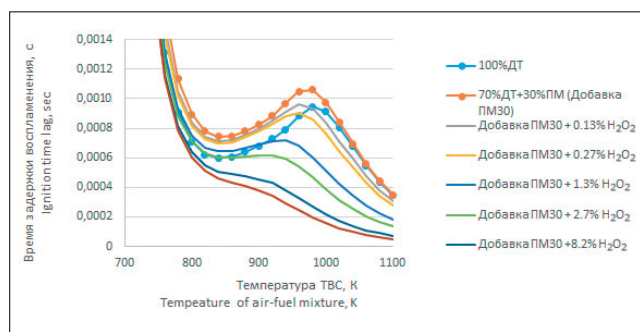


Рис. 2. Время задержки воспламенения биодизельного топлива (30% пальмового масла) в зависимости от добавки H_2O_2 и начальной температуры топливно-воздушной смеси

Fig. 2. Ignition time lag of biodiesel fuel (30% palm oil) depending on the H_2O_2 additive and the initial temperature of the fuel-air mixture

Для биодизельного топлива «добавка ПМ 30» с перекисью водорода в количестве 0,13-0,27% по массе (1,3-2,7 г на 1 кг топлива) позволяет модифицировать кинетику его воспламенения таким образом, что задержка воспламенения практически не отличается от задержки воспламенения ДТ в диапазоне температур 750-900 К. При добавке 13,0% H_2O_2 время задержки воспламенения сокращается на 25% при температуре сжатого воздуха 850 К.

Для повышения реакционной способности топлива «добавка ПМ 70» до уровня ДТ необходимый уровень добавок перекиси водорода существенно возрастает – до 9,3%. При этом реакционная способность топлива в диапазоне температур 750-900 К ниже, чем у ДТ, а при температурах 850-900 К – выше.

Так как для биодизельного топлива «добавка ПМ 70» в диапазоне температур 750-850 К повышение реакционной способности за счет добавок перекиси водорода до 9,3% не позволило достичь показателей времени задержки воспламенения ДТ, то была выполнена дополнительная серия расчетов с большим процентным содержанием H_2O_2 (рис. 4).

Увеличение добавки перекиси водорода до 18,6% не сократило существенно время задержки воспламенения в наиболее важном диапазоне температур для самовоспламенения 750-820 К. Превышение 18,6% добавки перекиси приводит к негативному эффекту: задержка воспламенения биодизельного топлива начинает расти по сравнению с ДТ.

Результаты расчетов показывают, что для каждого состава биодизельного топлива с различными до-

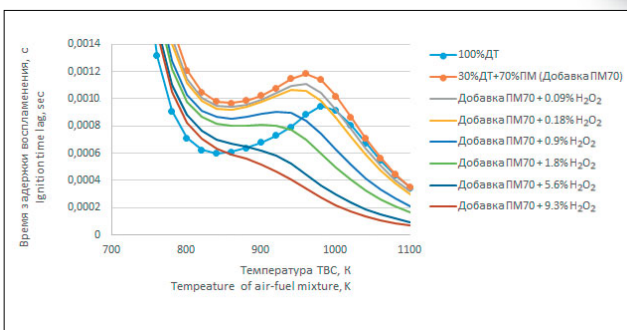


Рис. 3. Время задержки воспламенения биодизельного топлива (70% пальмового масла) в зависимости от добавки H_2O_2 и начальной температуры топливно-воздушной смеси

Fig. 3. Ignition time lag of biodiesel fuel (70% palm oil) depending on the H_2O_2 additive and the initial temperature of the fuel-air mixture

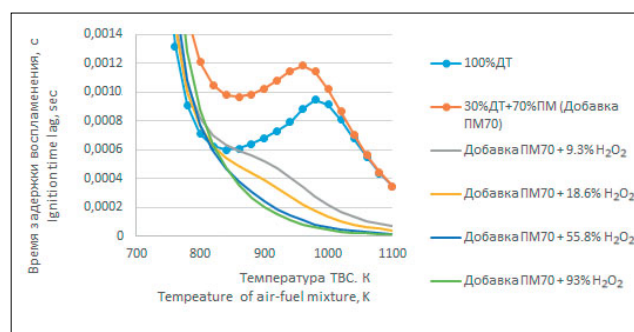


Рис. 4. Время задержки воспламенения биодизельного топлива (70% пальмового масла) в зависимости от повышенной добавки H_2O_2 и начальной температуры топливно-воздушной смеси

Fig. 4. Ignition time lag of biodiesel fuel (70% palm oil) depending on the increased H_2O_2 additive and the initial temperature of the fuel-air mixture

бавками пальмового масла существует оптимальное значение количества перекиси водорода, которое должно быть добавлено к топливу для максимального повышения его реакционной способности. Чем больше добавка пальмового масла к дизельному топливу, тем выше оптимальное значение добавки перекиси водорода для максимальной реакционной способности биодизельного топлива.

Выводы. Установили влияние добавок пальмового масла и перекиси водорода на время задержки воспламенения топлива.

При добавке до 10% ПМ время задержки воспламенения биодизельного топлива возрастает незначительно по сравнению с дизельным топливом – не более 5%. Дальнейшее увеличение добавки ПМ – свыше 30% – заметно усиливает задержку воспламенения топлива. При использовании в качестве топлива только пальмового масла задержка воспламенения в диапазоне температур 800-950 К возрастает в 2 раза.

Исследования показали эффективность использования H_2O_2 в качестве добавки к биодизельному то-

пливу. Для биодизельного топлива «добавка ПМ 30» в сочетании с H_2O_2 в количестве 1,3-2,7% по массе позволяет приблизить задержку воспламенения данного топлива в диапазоне температур от 750-900 К к точке воспламенения дизельного топлива, а при дальнейшем увеличении содержания H_2O_2 свыше 2,7% время задержки воспламенения по сравнению с дизельным топливом уменьшается. При добавке 13% H_2O_2 сокращение этого показателя составляет 25% при температуре сжатого воздуха 850 К.

Для повышения реакционной способности топлива «добавка ПМ 70» с целью приближения к уровню задержки воспламенения ДТ необходимо увеличить содержание H_2O_2 до 9,3% по массе. Однако достичь времени задержки воспламенения ДТ в диапазоне температур сжатого воздуха 750-820 К не удастся.

Рассчитали, что для каждого состава биодизельного топлива с различными добавками пальмового

масла существует оптимальное значение процентного по массе содержания перекиси водорода, которое следует добавить к топливу для максимального повышения его реакционной способности. Причем чем больше добавка пальмового масла к дизельному топливу, тем выше будет оптимальное содержание перекиси водорода для максимальной реакционной способности биодизельного топлива.

Выявили влияние перекиси водорода на реакционную способность этого топлива с добавками пальмового масла, что позволяет регулировать время задержки воспламенения биодизельного топлива.

Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 02. А03.21.0008).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / под ред. А.А. Макарова Л.М. Григорьева Т.А. Митровой. М.: ИНЭИ РАН при Правительстве РФ. 2016. 200 с.
2. Sanjid A. Impact of palm, mustard, waste cooking oil and calophyllum inophyllum biofuels on performance and emission of CI engine. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. N27. 664-682.
3. Шумилов К., Транспортная инфраструктура республики Нигерия // *Зарубежное военное обозрение*. 2004. N7. С. 18-22.
4. Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания. М.: НИЦ «Инженер» (Союз НИО). 2016. 292 с.
5. Loury M. Un nouveau carburant colonial possible. L'huile de palme methanolysée. *France Energet*. 1945. N11-12. 332.
6. Rashid M.M. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha and moringa oil methyl ester. *Industrial crops and products*. 2016. N79. 70-75.
7. Чибанда Э.К., Славущкий В.М., Курапин А.В., Шкумат Е.А. Анализ возможностей использования пальмового масла как возобновляемого энергоресурса в качестве топлива для дизелей. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет. 2016. С. 51-56.
8. Mosarof M.H., Kalam M.A., Masjuki H.H., Ashraf A.M., Rashed M.M., Imdadul H.K., Monirul I.M. Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics. *Energy conversion and Management*. 2015. N105. 617-629.
9. Ощепков П.П., Адедожа Адегбенро С. Альтернативное топливо для автотранспорта Нигерии на основе пальмового масла // *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2017. Т. 18. N4. С. 437-444.
10. О'Брайен Р. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение. пер. с англ. СПб.: Профессия. 2007. 752 с.
11. Ranzi E., Frassoldati A., Stagni A., Pelucchi M., Cuoci A., Faravelli T. Reduced kinetic schemes of complex reaction systems: Fossil and biomass-derived transportation fuels. *International Journal of Chemical Kinetics*. 2014. Vol. 46. N9. 512-542.
12. Saggese Chiara, Frassoldati Alessio, Cuoci Alberto, Faravelli Tiziano, Ranzi Eliseo. A lumped approach to the kinetic modeling of pyrolysis and combustion of biodiesel fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2013. N34. 427-434.
13. Deminsky M., Chorkov V., Belov G., Cheshigin I., Knizhnik A., Shulakova E., Shulakov M., Iskandarova I., Alexandrov V., Petrusev A., Kirillov I., Strelkova M., Umanski S., Potapkin B. Chemical Workbench – integrated environment for materials science. *Computational Materials Science*. 2003. Vol. 28. Iss. 2. 169-178.
14. Ranzi E., Frassoldati A., Grana R., Cuoci A., Faravelli T., Kelley A.P., Law C.K. Hierarchical and comparative kinetic modeling of laminar flame speeds of hydrocarbon and oxygenated fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2012. N38(4). 468-501.
15. Faravelli T., Frassoldati A., Ranzi E. Kinetic modeling of the interactions between NO and hydrocarbons in the oxidation of hydrocarbons at low temperatures. *Combustion and Flame*. 2003. N132(1-2). 188-207.
16. Frassoldati A., Faravelli T. and Ranzi E. Kinetic modeling of the interactions between NO and hydrocarbons at high temperature. *Combustion and Flame*. 2003. N135. 97-112.



REFERENCES

1. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2016 [Forecast of power engineering development in the world and Russia 2016]. ed. by A.A. Makarova, L.M. Grigor'yev, T.A. Mitrova. Moscow: INEI RAN pri Pravitel'stve RF. 2016. 200 (In Russian).
2. Sanjid A. Impact of palm, mustard, waste cooking oil and calophyllum inophyllum biofuels on performance and emission of CI engine. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. N27. 664-682 (In English).
3. Shumilov K., Transportnaya infrastruktura respubliki Nigeriya [Transport Infrastructure of the Republic of Nigeria]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*. 2004. N7. 18-22 (In Russian).
4. Markov V.A., Devyanin S.N., Zykov S.A., Gaydar S.M. Biotopliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Biofuels for internal combustion engines]. Moscow: NITS "Inzhener" (Soyuz NIO). 2016. 292 (In Russian).
5. Loury M. Un nouveau carburant colonial possible. L'huile de palme methanolysée. *France Energet*. 1945. N11-12. 332 (In French).
6. Rashid M.M. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha and moringa oil methyl ester. *Industrial crops and products*. 2016. N79. 70-75 (In English).
7. Chibanda E.K., Slavutskiy V.M., Kurapin A.V., Shkumat E.A. Analiz vozmozhnostey ispol'zovaniya pal'movogo masla kak vozobnovlyayemogo energoresursa v kachestve topliva dlya dizeley [Analyzing the prospects of using palm oil (a renewable energy source) as a fuel for diesel engines]. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. 2016. 51-56 (In Russian).
8. Mosarof M.H., Kalam M.A., Masjuki H.H., Ashraful A.M., Rashed M.M., Imdadul H.K., Monirul I.M. Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics. *Energy conversion and Management*. 2015. N105. 617-629 (In English).
9. Oshchepkov P.P., Adedozha Adegbenro S. Al'ternativnoe toplivo dlya avtotransporta Nigerii na osnove pal'movogo masla [Alternative fuel based on palm oil for motor vehicles of Nigeria]. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2017. Vol. 18. N4. 437-444 (In Russian).
10. O'Brayyen R. Zhiry i masla. Proizvodstvo, sostav i svoystva, primeneniye [Fats and oils. Production, composition and properties, application]. Translated from English. Saint Petersburg: Professiya. 2007. 752 (In Russian).
11. Ranzi E., Frassoldati A., Stagni A., Pelucchi M., Cuoci A., Faravelli T. Reduced kinetic schemes of complex reaction systems: Fossil and biomass-derived transportation fuels. *International Journal of Chemical Kinetics*. 2014. Vol. 46. N9. 512-542 (In English).
12. Saggese Chiara, Frassoldati Alessio, Cuoci Alberto, Faravelli Tiziano, Ranzi Eliseo. A lumped approach to the kinetic modeling of pyrolysis and combustion of biodiesel fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2013. N34. 427-434 (In English).
13. Deminsky M., Chorkov V., Belov G., Cheshigin I., Knizhnik A., Shulakova E., Shulakov M., Iskandarova I., Alexandrov V., Petrusev A., Kirillov I., Strelkova M., Umanski S., Potapkin B. Chemical Workbench – integrated environment for materials science. *Computational Materials Science*. 2003. Vol. 28. Is. 2. 169-178 (In English).
14. Ranzi E., Frassoldati A., Grana R., Cuoci A., Faravelli T., Kelley A.P., Law C.K. Hierarchical and comparative kinetic modeling of laminar flame speeds of hydrocarbon and oxygenated fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2012. N38(4). 468-501 (In English).
15. Faravelli T., Frassoldati A., Ranzi E. Kinetic modeling of the interactions between NO and hydrocarbons in the oxidation of hydrocarbons at low temperatures. *Combustion and Flame*. 2003. N132(1-2). 188-207 (In English).
16. Frassoldati A., Faravelli T. and Ranzi E. Kinetic modeling of the interactions between NO and hydrocarbons at high temperature. *Combustion and Flame*. 2003. N135. 97-112 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 27.05.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 27.05.2019

Статья принята к публикации 01.07.2019
The paper was accepted
for publication on 01.07.2019