

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625783>

Оригинальное исследование



Исследование сажевыделения в тракторном дизеле, работающем на биотопливе

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин

Вятский государственный агротехнологический университет, Киров, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. С одной стороны, дизельный двигатель, работающий на жидком топливе нефтяного происхождения, является надежной основой для тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин, а с другой стороны реалии современного времени заставляют нас думать и об экологической составляющей этих дизельных двигателей, и, кроме того, не забывать про экономию того самого невозобновляемого нефтяного моторного топлива. С целью снижения антропогенного воздействия на природные экосистемы и оценки дымности отработавших газов тракторного дизеля, работающего на этаноле и рапсовом масле, в работе рассмотрена современная модель образования в нем сажесодержания.

Цель работы — разработка современной модели сажевыделения в тракторном дизеле, работающем на этаноле и рапсовом масле, для оценки дымности отработавших газов и снижения антропогенного воздействия на природные экосистемы.

Материалы и методы. Для моделирования процессов образования и выгорания частиц сажи в тракторном дизеле объем камеры сгорания условно был разделен на несколько зон (показатели сажесодержания в различных зонах складывались), а цикл вычислений уровня дымности отработавших газов включал несколько этапов (определение давления, интегральной и дифференциальной характеристик тепловыделения, осредненной температуры рабочего тела, показателей топливоподачи и скорости испарения топлива, локальных коэффициентов избытка воздуха, состава газов, концентрации продуктов разложения и окисления рапсового масла и этанола, количества частиц сажи, массы дисперсного углерода, скорости перехода частиц в зону выгорания).

Результаты. Разработанная математическая модель позволяет рассчитать концентрацию сажи и основных компонентов газовой смеси в реакционной зоне камеры сгорания и содержание сажи в отработавших газах при различных скоростных и нагрузочных режимах работы тракторного дизеля, получить ценную информацию о динамике протекания основных этапов образования и выгорания сажи в цилиндре при работе тракторного дизеля на этаноле и рапсовом масле. Получены и представлены результаты численного моделирования образования и выгорания сажи в цилиндре тракторного дизеля при работе на дизельном топливе, этаноле и рапсовом масле.

Заключение. На основании разработанной современной модели сажевыделения в тракторном дизеле, работающем на этаноле и рапсовом масле, проведена оценка его дымности отработавших газов, наглядно показывающая снижение в 3,4–3,8 раза в сравнении с работой на дизельном топливе. Представленная методика расчёта сажевыделения тракторного дизеля может быть использована при многозонном моделировании и исследовании таких внутрицилиндровых процессов как тепловыделение, теплообмен и др. Точность вычислений по предложенной модели характеризуется совершенством математических алгоритмов, описывающих скорость испарения топлива, развития топливного факела, определения локальных температур, скорости распространения пламени, локальный состав газов в цилиндре и др.

Ключевые слова: тракторный дизель; этанол; рапсовое масло; сажа; дымность; отработавшие газы.

Как цитировать:

Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование сажевыделения в тракторном дизеле, работающем на биотопливе // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 4. С. 375–385. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625783>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625783>

Original Study Article

Investigation of carbon-black emissions of a tractor biofuel diesel

Vitaly A. Likhanov, Oleg P. Lopatin

Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: On the one hand, a petroleum-based liquid fuel diesel engine is a reliable basis for tractors and self-propelled agricultural machines, and on the other hand, the current trends make us to think about the environmental component of these diesel engines and besides to remember about reasonable use of non-renewable petroleum motor fuel. In order to reduce the anthropogenic impact on natural ecosystems and to assess the smokiness of exhaust gases from a tractor diesel running on ethanol and rapeseed oil, the paper considers the relevant model of the carbon-black formation inside it.

AIM: Development of the relevant model of carbon-black emission in a tractor diesel running on ethanol and rapeseed oil to assess the smokiness of exhaust gases and to reduce anthropogenic impact on natural ecosystems.

METHODS: To simulate the processes of formation and burnout of carbon-black particles in a tractor diesel engine, the volume of the combustion chamber was conditionally divided into several areas (soot content indicators in different areas were added up), and the cycle of calculating the exhaust gas smokiness level included several stages (determination of pressure, integral and differential characteristics of heat dissipation, average temperature of the working fluid, fuel supply indicators and fuel evaporation rate, local coefficients of excess air, composition of gases, concentration of decomposition and oxidation products of rapeseed oil and ethanol, the number of carbon-black particles, the mass of dispersed carbon, the rate of transition of particles to the burnout zone).

RESULTS: The developed mathematical model is capable of calculating the carbon-black concentration and the main components of the gas mixture in the reaction zone of the combustion chamber, the content of carbon-black in the exhaust gases at various speed and load modes of operation of a tractor diesel engine. It is capable of obtaining valuable information about the dynamics of the main stages of carbon-black formation and burnout in the cylinder of a tractor diesel engine running on ethanol and rapeseed oil. The results of numerical simulation of carbon-black formation and burnout in a tractor diesel cylinder when running on diesel fuel, ethanol and rapeseed oil are obtained and presented.

CONCLUSION: Based on the developed relevant model of carbon-black emission in a tractor diesel engine running on ethanol and rapeseed oil, an assessment of its exhaust gas smokiness was carried out, clearly showing a decrease by 3.4–3.8 times in comparison with diesel fuel operation. The presented method for calculating the carbon-black emission of tractor diesel can be used in the multi-area modeling and researches of such in-cylinder processes as heat generation, heat transfer, etc. The accuracy of calculations based on the proposed model is characterized by the perfection of mathematical algorithms describing the rate of fuel evaporation, the development of a fuel flare, the determination of local temperatures, the rate of flame propagation, the local composition of gases in the cylinder, etc.

Keywords: tractor diesel; ethanol; rapeseed oil; carbon black; smokiness; exhaust gases.

To cite this article:

Likhanov VA, Lopatin OP. Investigation of carbon black emissions in tractor diesel powered by biofuels. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(4):375–385. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625783>

Received: 18.01.2024

Accepted: 15.08.2024

Published online: 30.08.2024

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время дизели благодаря своим, в определенной степени, лучшим мощностным и экономическим критериям, в сравнении с бензиновыми двигателями, широко используются в железнодорожном, морском, сельскохозяйственном и автотранспортном хозяйствах. Однако, ввиду значительного усложнения взаимодействия человека с окружающей средой происходят непредвиденные изменения в экологических системах, вызванные загрязнениями воздушного бассейна, водных и лесных ресурсов. Поэтому, в настоящее время, дизели, особенно по критериям токсичности отработавших газов (ОГ), перестают удовлетворять современным требованиям [1–4]. В значительной степени это относится конечно же к их сажедержанию в ОГ. Кроме того, сажа, образующаяся при сгорании топлива, является одним из наиболее токсичных компонентов ОГ тракторных дизелей [5–9]. Выбрасываемые в окружающую среду с ОГ частицы сажи адсорбируют на своей поверхности канцерогенные полициклические углеводороды, в том числе чрезвычайно опасный бензапирен, способный вызывать опухоли и новообразования в живых организмах. Ну и наверно известно каждому, что частицы сажи вызывают хронические заболевания органов дыхания. Поэтому проблема снижения содержания сажи в ОГ тракторных дизелей была и, к сожалению, все еще остается актуальной на сегодняшний день, и требует решения [10–15].

В энергетическом горении с экономической и экологической точек зрения сажа является нежелательным продуктом. Традиционно большой интерес к вопросам сажеобразования существовал в области технологического горения, где сажа является целевым продуктом процесса. Несмотря на различный целевой подход в технологическом и энергетическом горении, физические и химические основы процесса во многом идентичны. Поэтому весь большой опыт изучения процесса сажеобразования, накопленный в различных областях науки о горении, может составить единую и надежную теоретическую основу рассмотрения этого сложного многостадийного процесса применительно к условиям сгорания в тракторных дизелях, работающих на новых (альтернативных) видах топлива [16–23].

Изучению физико-химических свойств сажи посвящено значительное число работ [24–29]. Благодаря применению современных методов исследований, таких как электронная микроскопия высокого разрешения, рентгенофлуорескопия и спектроскопия, газовая хроматография, контактных и оптических методов исследования за последние десятилетия получено достаточно полное представление о размерах, структуре и физико-химических свойствах сажи [24–29].

Цель работы — разработка современной модели сажевыделения в тракторном дизеле, работающем на этаноле и рапсовом масле (РМ), для оценки дымности

отработавших газов и снижения антропогенного воздействия на природные экосистемы.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для моделирования процессов образования и выгорания частиц сажи в тракторном дизеле условно разделим объем камеры сгорания (КС) на три зоны (зону «чистого», не участвующего в сгорании воздуха; зону термического разложения топлива, в которой происходят процессы образования частиц сажи, их рост и коагуляция и зону продуктов сгорания, в которой преимущественно идут процессы окисления и газификации частиц сажи).

Геометрически зона чистого воздуха занимает периферийные объемы КС, в которых не происходят процессы пиролиза и горения. Зона термического разложения топлива и образования сажи совпадает с внутренней областью топливного факела. Зона выгорания частиц сажи находится на поверхности горячей паровой мантии факела. Каждая зона характеризуется однородным по всему объему составом и температурным полем. Аналогичная методика моделирования сажеобразования в цилиндре дизеля при работе на дизельном топливе представлена в работах Батурина, Лоскутова, Кожина [30].

При работе тракторного дизеля на этаноле и РМ в зону термического разложения в процессе испарения топлив поступают углеводороды и газ из окружающего объема. Допустим, что по мере развития фронта пламени, часть углеводородов выгорает, не проходя стадий глубокого пиролиза, тогда скорость изменения концентрации компонентов газовой смеси в реакционной зоне может быть выражена уравнением:

$$\frac{dM_i}{d\varphi} = \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_{\sigma} + \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_k + \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_{\chi}, \quad (1)$$

где $dM_i/d\varphi$ — суммарная скорость изменения концентрации i -го компонента газовой смеси; $(dM_i/d\varphi)_{\sigma}$ — скорость изменения концентрации i -го компонента, связанного с подводом испаренного топлива; $(dM_i/d\varphi)_k$ — скорость изменения концентрации i -го компонента вследствие предпламенных химических превращений топлива; $(dM_i/d\varphi)_{\chi}$ — скорость изменения концентрации i -го компонента в процессе основного горения; φ — угол поворота коленчатого вала (п.к.в.) дизеля.

Скорости химических превращений реагентов газовой смеси определяются из уравнения:

$$\left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_k = \frac{V_p}{6n} \cdot \sum_j W_j, \quad (2)$$

где V_p — объем реакционной зоны; W_j — скорость j -той химической реакции кинетического механизма, n — частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹.

Декарбоксилирование является начальной стадией термического распада молекул жирных кислот РМ и происходит при более низких температурах, поэтому скорость брутто-реакции распада молекулы РМ в зоне высокотемпературного пиролиза лимитируется скоростью разложения образовавшегося олефина.

Оценку температуры пламени проведем по балансу энтальпий газов в зоне продуктов сгорания. Состав газов в зоне горения характеризует локальный коэффициент избытка воздуха α_r , который определяется по выражению [25]:

$$\alpha_r = \frac{\alpha \cdot \xi_b}{\chi}, \quad (3)$$

где ξ_b — степень эффективного использования воздушного заряда, χ — интегральная функция тепловыделения.

Функция $\xi_b(\varphi)$ в соответствии с работой [25] удовлетворительно аппроксимируется зависимостью:

$$\xi_b = 1 - C_b h \cdot \overline{\varphi_z} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-h^2 \overline{\varphi_z}^2), \quad (4)$$

где C_b и h — коэффициенты пропорциональности; $\overline{\varphi_z}$ — отношение текущего угла п.к.в. к действительной продолжительности сгорания.

Испарение каждой капли топлива подчиняется закону Срезневского:

$$d_k^2 = d_0^2 - K \cdot \tau_n, \quad (5)$$

где d_0 , d_k — соответственно начальный и текущий диаметр капли; K — константа испарения; τ_n — время от начала испарения данной капли (момента поступления ее в рассматриваемую зону) до текущего момента.

Функция испарения капли массой m от угла п.к.в. на основании закона Срезневского примет вид:

$$m = \frac{\rho \cdot \pi}{6} \left(d_0^2 - K \cdot \frac{\varphi_i}{6n} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

где m — масса капли; φ_i — текущий угол п.к.в. от момента попадания капли в КС.

Если закон топливоподачи задан массивом, тогда количество топлива в цилиндре удобно определять по уравнению суммы неиспарившихся частей, поступивших в различные моменты времени по закону топливоподачи.

Количество молей i -го вещества dM_i , выводимого из зоны пиролиза, зависит от его объемной концентрации и пропорционально доле выгорающего топлива, моль/град п.к.в.:

$$\left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_{\chi} = M_i \frac{d\chi/d\varphi}{\sigma_u - \chi}, \quad (7)$$

где σ_u — интегральный закон испарения топлива в КС.

В реакционную зону поступают молекулы углеводородов топлива пропорционально скорости испарения, которые распадаются на более мелкие молекулы и радикалы. Заключительным этапом цепочки реакций пиролиза углеводородов является взрывное разложение ацетилена с образованием химических зародышей сажи. Следовательно, скорость образования зародышей сажи пропорциональна скорости разложения ацетилена, которая определяется по представленным уравнениям химической кинетики. Состав продуктов в реакционной зоне зависит от скорости испарения топлива и локального коэффициента избытка воздуха.

Обозначим количество частиц сажи в реакционной зоне N_1 в зоне выгорания N_2 . Учитывая скорость разложения углеводородов и окисления молекул ацетилена, а также отвод компонентов из зоны реакции, которая принимается пропорциональной скорости тепловыделения, можно определить количество молей C_2 , которые перешли в твердую фазу по гетерогенным реакциям роста частиц сажи. Пренебрегая незначительным содержанием атомов водорода и других элементов в частице сажи, принимая постоянную плотность частицы $1,9 \text{ г/см}^3$, можно вывести уравнение, связывающее количество молей C_2 z_q в частице диаметром D_C :

$$D_C = 0,342 \cdot \sqrt[3]{N_A \cdot z_q}, \quad (8)$$

где z_q — моль C_2 в частице сажи; N_A — число Авогадро.

Для того, чтобы установить средний диаметр частицы сажи, нужно общее количество молей C_2 z_1 поделить на количество частиц в реакционной зоне N_1 . Тогда скорость изменения среднего диаметра частицы сажи в зоне образования с учетом уравнения (8) определится по выражению:

$$\frac{dD_1}{d\varphi} = 0,342 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{z_1}{N_1} \right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \frac{\left[\frac{dz_1}{d\varphi} \cdot N_1 - \frac{dN_1}{d\varphi} z_1 \right]}{N_1^2}, \quad (9)$$

где D_1 — среднемассовый диаметр частиц в зоне образования сажи, нм;

В зоне образования сажи происходит частичная газификация атомов углерода по гетерогенным реакциям окисления. Массовая скорость выгорания частиц сажи пропорциональна произведению потока углерода на суммарную поверхность частиц, находящихся в единице объема. Следовательно, скорость газификации углерода зависит от диаметра частицы. Согласно представленной выше теории газификации сажи окислителями в этих реакциях главным образом выступают диоксид углерода, вода и кислород. Поток углерода по этим реакциям суммируется. Аналогично скорость гетерогенного роста частиц сажи пропорциональна поверхности частиц, следовательно, зависит от диаметра.

В зону выгорания частицы поступают, проходя через фронт пламени без газификации. В зоне выгорания частицы сажи продолжают взаимодействовать с окислителем, смешиваясь с продуктами сгорания. Изменение диаметра частиц в зоне выгорания определяется совокупностью трех процессов: выгорания, массоподвода из зоны образования и процессом коагуляции.

Количество частиц сажи в зоне выгорания с учетом броуновской коагуляции можно определить по уравнению [25]:

$$\frac{dN_2}{d\phi} = \frac{d\chi/d\phi}{\sigma_u - \chi} \cdot N_1 - P_0 \cdot 3,51 \cdot 10^{14} \cdot \sqrt{T_2 / 1800} \cdot \sqrt{D_2} \cdot \frac{N_2^2}{6 \cdot n \cdot V_2}, \quad (10)$$

где P_0 — стерический фактор; T_2 — температура в зоне выгорания.

Первое слагаемое в уравнении (10) учитывает подвод частиц сажи из зоны образования. В первом приближении за V_2 можно принять текущий объем цилиндра. В более точной трактовке V_2 это объем КС, охваченный пламенем. Принимая ввод частиц сажи с начальным диаметром D_n в количестве N_n пропорционально скорости испарения топлива, дифференциальное уравнение количества частиц в зоне образования можно записать в виде:

$$\frac{dN_1}{d\phi} = d\sigma_u \cdot N_n + \frac{dN_o}{d\phi} - N_1 \cdot \frac{d\chi/d\phi}{\sigma_u - \chi}, \quad (11)$$

где $dNO/d\phi$ — скорость образования зародышей частиц сажи.

Скорость газификации твердого углерода в зоне выгорания сажи определяется согласно уравнению:

$$\frac{dz_{cr}}{d\phi} = -\frac{z_2 \cdot F_y \cdot J_c}{4 \cdot 6 \cdot n}, \quad (12)$$

где J_c — суммарный поток углерода, г/(м² с); F_y — удельная поверхность частиц сажи, г/м².

Величина J_c рассчитывается по выражениям для всех реакций газификации частиц сажи свободным, оставшимся от сгорания топлива кислородом воздуха, углекислым газом и парами воды. Состав продуктов сгорания и величина потока углерода рассчитываются по отдельным подпрограммам.

Начальное количество молей C_2 определяется пропорционально доле воздуха в реакционной зоне и вычисляется по выражению:

$$z_{HO} = \frac{z_H \cdot \alpha_r}{\alpha}. \quad (13)$$

Текущую массу сажи в цилиндре можно определить, умножив количество молей C_2 в каждой зоне на молярную массу частицы роста:

$$N = 24 \cdot (z_1 + z_2). \quad (14)$$

Количество частиц сажи в цилиндре также вычислялось алгебраическим сложением частиц, находящихся в каждой зоне. Массовая концентрация сажи в цилиндре определялась как отношение массы сажи к текущему объему цилиндра. Начальное содержание сажи в цилиндре принимаем пропорционально объему остаточных газов и концентрации сажи, замеренной на выпуске.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отладка работы математической модели производилась по экспериментальным данным дымности ОГ тракторного дизеля [7, 21, 25, 28] при работе на ДТ в условиях различных нагрузочных и скоростных режимов работы. Исходными данными для расчета являлись полученные экспериментально индикаторное давление в цилиндре, осредненная температура газов, скорость тепловыделения (рис. 1), скорость испарения топлив (рис. 2).

Оптимальные установочные углы опережения впрыскивания топлив (УУОВ) определялись экспериментальным путем и составили для РМ и этанола $\Theta_{PM} = \Theta_{Э} = 34^\circ$ п.к.в. до ВМТ. Цикловые подачи топлива были равны для этанола $q_{Э} = 52$ мг/цикл, для запального РМ $q_{PM} = 13$ мг/цикл [7, 21]. УУОВ дизельного топлива составлял 30 град. п.к.в. до ВМТ. Цикловая подача дизельного топлива составляла 42 мг/цикл.

Период задержки воспламенения при работе тракторного дизеля на биотопливе увеличивался. Это происходит по трем основным причинам: пониженное цетановое число, падение скорости испарения запального топлива в КС вследствие ухудшения процесса смесеобразования, снижение температуры газов в цилиндре при испарении спирта. Этот эффект компенсируется высокой скоростью сгорания этанола и активным подводом тепла к рабочему телу после ВМТ. Поскольку цикловая подача этанола на номинальном режиме на 20% больше цикловой подачи ДТ и начало подачи этанола смещено на 4 градуса п.к.в. от ВМТ, то увеличивается объем факела этанола к моменту начала сгорания. Теплота сгорания этилового спирта и РМ ниже, чем ДТ. Это приводит к снижению расчетной температуры газов в зоне сгорания (рис. 3).

После инициации тепловыделения начинается отвод частиц сажи из зоны образования и их смешивание с частицами, находящимися в зоне выгорания. Масса поступивших частиц распределяется на все частицы. До начала сгорания частицы сажи в зонах не претерпевали изменения диаметра. С появлением большого количества зародышей средний диаметр частиц сажи стремительно падает (рис. 4).

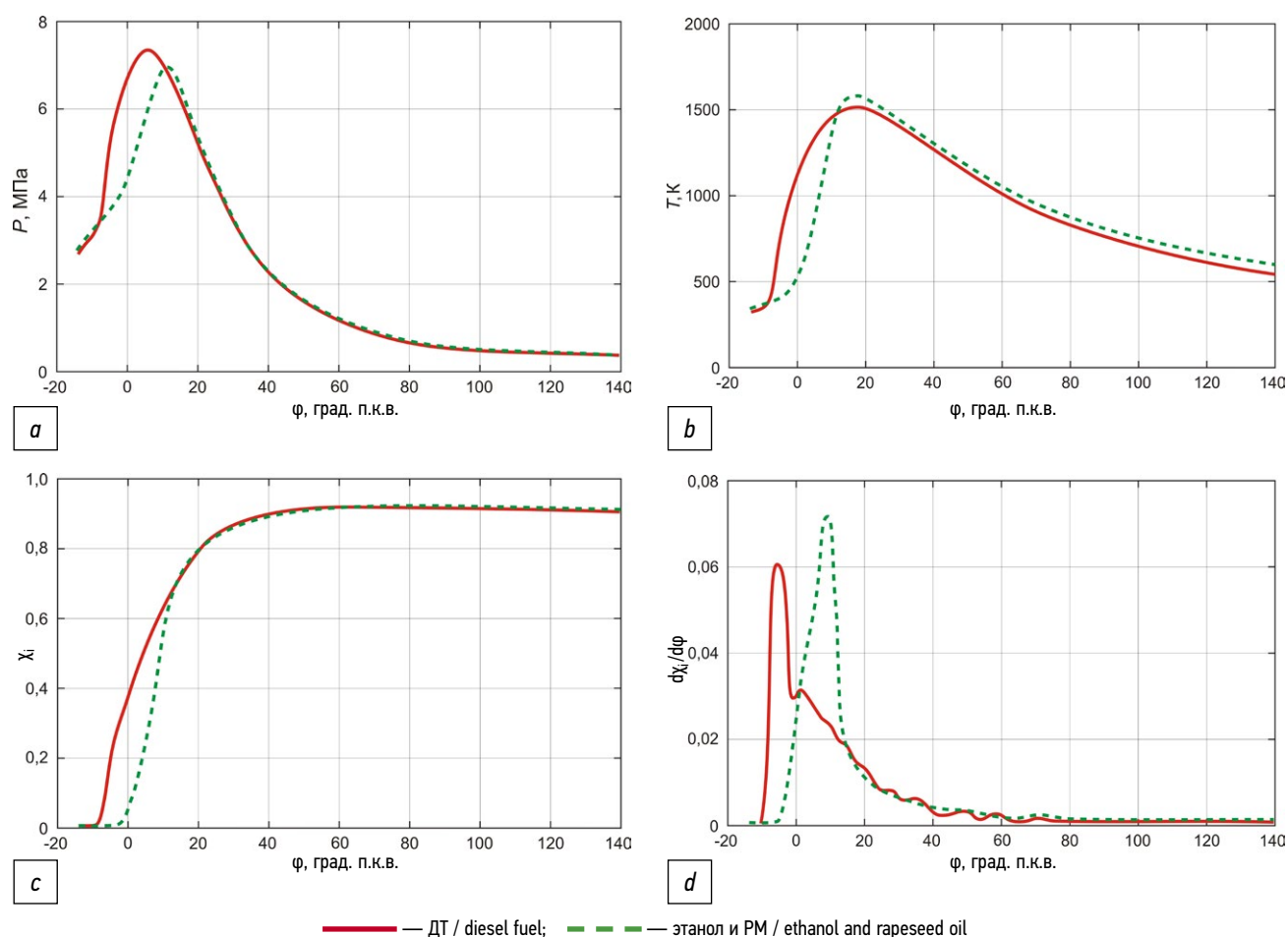


Рис. 1. Показатели процесса сгорания тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 на номинальном режиме работы: *a* — индикаторное давление; *b* — осредненная температура газов в цилиндре; *c* — активное тепловыделение; *d* — скорость тепловыделения.

Fig. 1. Indicators of the combustion process of the 2Ch 10.5/12.0 tractor diesel engine at the nominal operating mode: *a* — indicator pressure; *b* — average temperature of gases in the cylinder; *c* — active heat dissipation; *d* — heat dissipation rate.

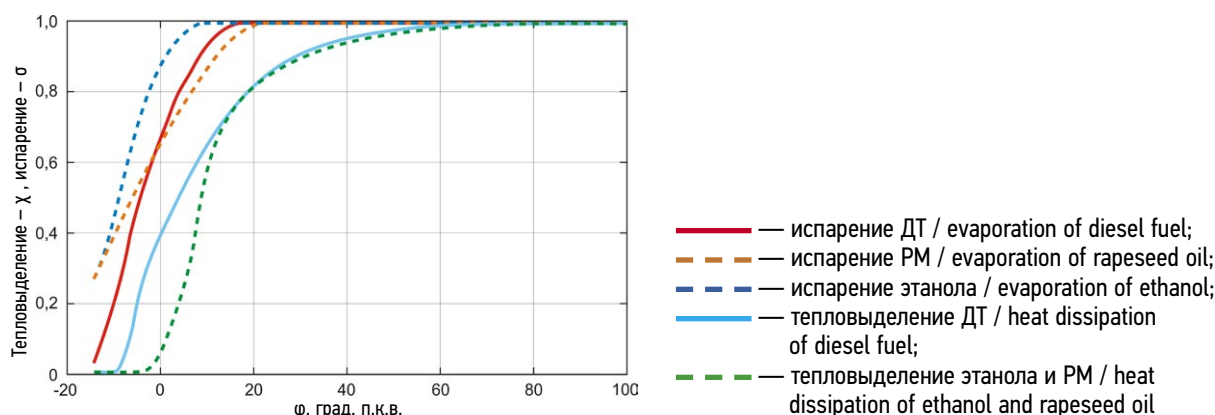


Рис. 2. Характеристики испарения топлив и тепловыделения в КС тракторного дизеля.

Fig. 2. Characteristics of fuel evaporation and heat dissipation in the combustion chamber of the tractor diesel.

Максимальное количество частиц при работе дизеля на этаноле и РМ в 2,5 раза выше, чем при работе на ДТ. Это вызвано ростом периода задержки воспламенения и накопления большого количества углеводородов в реакционной зоне, а также низкой скоростью коагуляции

частиц в реакционной зоне разложения этанола, что уже отмечалось выше. Перемещение экстремумов функций количества частиц и среднемассового диаметра на поздние углы п.к.в. вызвано смещением процесса сгорания.

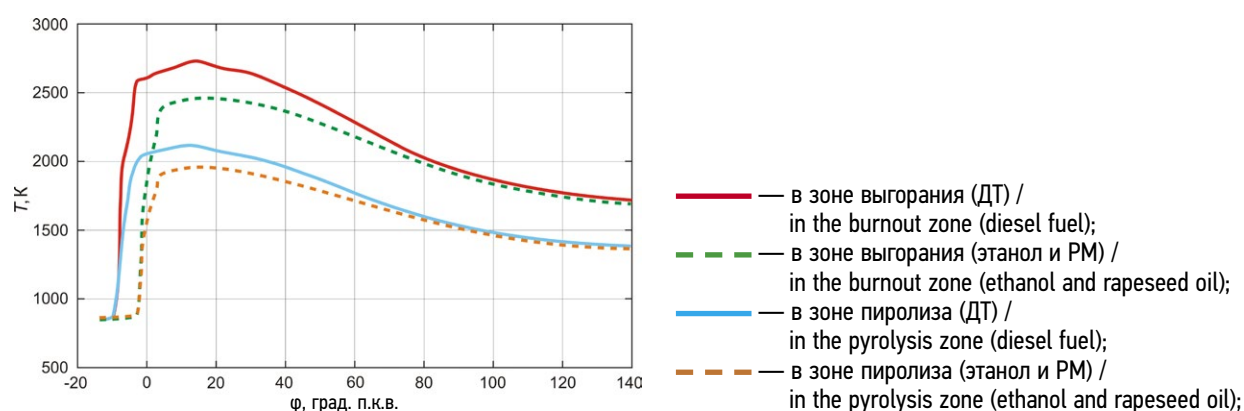


Рис. 3. Определяющие температуры процессов образования и выгорания сажи.

Fig. 3. Temperature curves of the processes of carbon black formation and burnout.

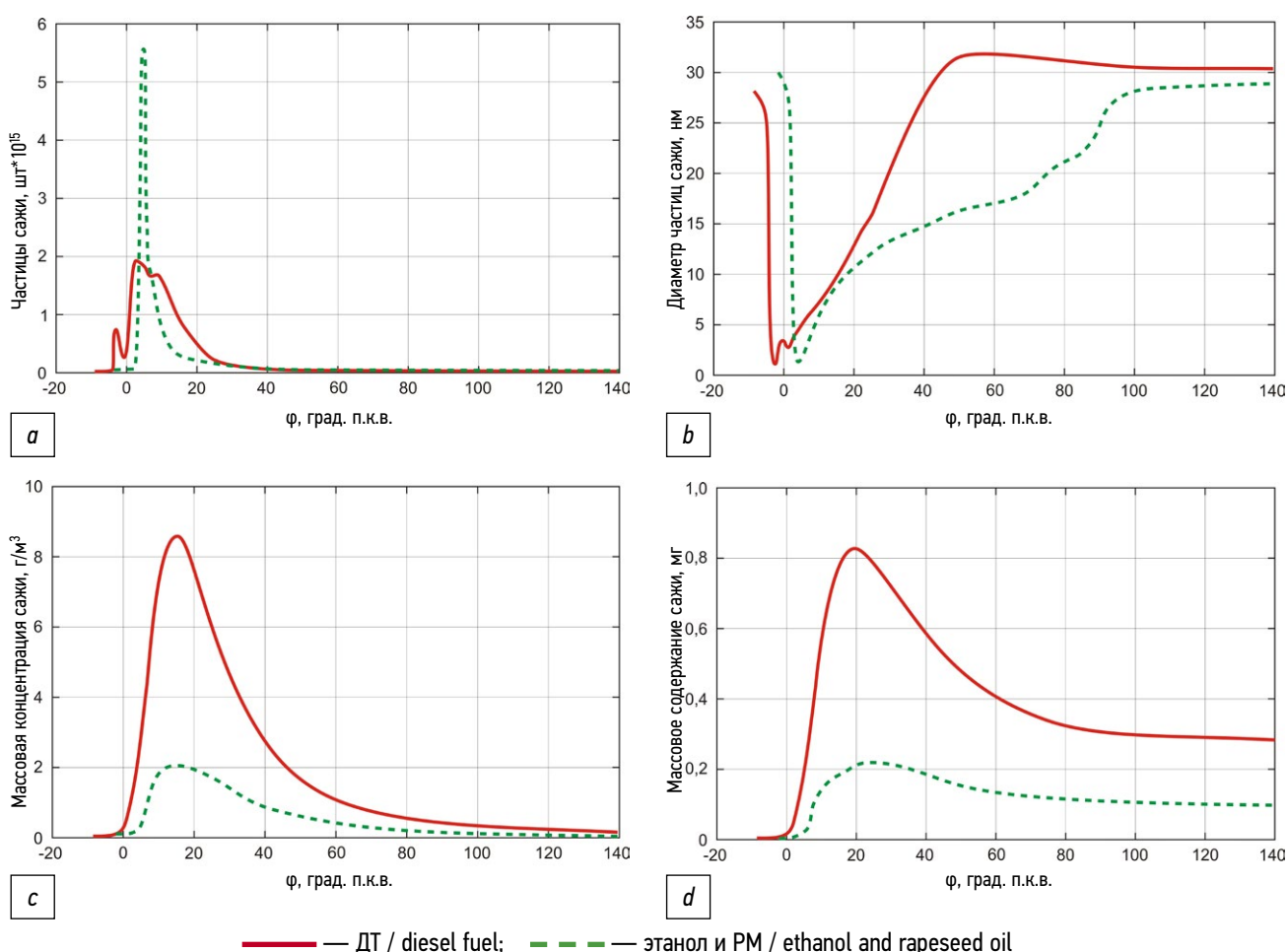


Рис. 4. Расчётные показатели сажесодержания в цилиндре тракторного дизеля при работе: *a* — количество частиц сажи, шт.; *b* — текущий среднемассовый диаметр частиц сажи в цилиндре, нм; *c* — массовая концентрация сажи в цилиндре, г/м³; *d* — массовое содержание сажи в цилиндре, мг.

Fig. 4. Calculated indicators carbon-black content in the cylinder of the tractor diesel engine during operation: *a* — the number of carbon black particles, pcs.; *b* — the current average mass diameter of carbon black particles in the cylinder, nm; *c* — the mass concentration of carbon black in the cylinder, g/m³; *d* — the mass content of carbon black in the cylinder, mg.

К моменту открытия выпускного клапана при $\varphi = 140^\circ$ п.к.в. массовое содержание сажи в цилиндре дизеля стабилизируется, а скорость газификации сажи постепенно снижается до минимальных значений.

По результатам расчёта процесса сажеобразования мы видим, что концентрация сажи в цилиндре снижается на всех углах п.к.в. При работе дизеля на этаноле и РМ на номинальном режиме максимальная расчетная

концентрация сажи в цилиндре составляет 1,93 г/м³ при $\varphi = 15,6^\circ$ п.к.в. При $\varphi = 140^\circ$ п.к.в. концентрация сажи в цилиндре падает до 0,091 г/м³. Массовое содержание сажи достигает максимального значения при 26,1 град п.к.в. и составляет 0,216 мг. В момент открытия выпускного клапана масса сажи падает до 0,092 мг. При работе на ДТ расчетное максимальное содержание сажи составляет 0,825 мг при $\varphi = 19,2^\circ$ п.к.в. Масса сажи при открытии выпускного клапана составляет 0,279 мг, что в три раза больше, чем при работе на биотопливе.

ВЫВОДЫ

На основании разработанной математической модели проведен расчет концентрации сажи и основных компонентов газовой смеси в реакционной зоне КС и содержание сажи в ОГ при различных скоростных и нагрузочных режимах работы тракторного дизеля, работающего на этаноле и РМ. Получена ценная информация о динамике протекания основных этапов образования и выгорания сажи в цилиндре при работе тракторного дизеля на этаноле и РМ, показывающая снижение в 3,4–3,8 раза в сравнении с работой на штатном дизельном топливе.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.А. Лиханов — научное руководство, анализ и доработка текста, утверждение финальной версии; О.П. Лопатин — формирование структуры статьи, анализ

литературных данных, редактирование текста, создание изображений, составление выводов и заключения. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.A. Likhonov — scientific guidance, analysis and revision of the text, approval of the final version; O.P. Lopatin — formation of the structure of the article, analysis of literary data, text editing, image creation, drawing conclusions and conclusions. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Условные обозначения и сокращения:

РМ — рапсовое масло
КС — камера сгорания
ОГ — отработавшие газы
ПЗВ — период задержки воспламенения
п.к.в. — поворот коленчатого вала
ВМТ — верхняя мертвая точка

УУОВ — установочный угол опережения впрыскивания
 q_{PM} — цикловая подача рапсового масла
 $q_{Э}$ — цикловая подача этанола
 $\Theta_{Э}$ — установочный угол опережения впрыскивания этанола, град
 Θ_{PM} — установочный угол опережения впрыскивания рапсового масла, град

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naeem A., Zaman Sh., Farooq M., et al. Biodiesel production from waste cooking oil employing natural bentonite supported heterogeneous catalyst: waste to biodiesel // Korean Journal of Chemical Engineering. 2022. Vol. 39, № 6. P. 1450–1459. doi: 10.1007/s11814-022-1068-5
2. Abusweireh R.S., Rajamohan N., Vasseghian Y. Enhanced production of biodiesel using nanomaterials: a detailed review on the mechanism and influencing factors // Fuel. 2022. Vol. 319. P. 123862. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123862
3. Lopatin O.P. Calculation of the process of nitrogen oxides formation during combustion of methanol in the engine // IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Engng. 2020. Vol. 919. P. 062011. doi: 10.1088/1757-899X/919/6/062011
4. Lv J., Wang S., Meng B. The effects of nano-additives added to diesel-biodiesel fuel blends on combustion and emission characteristics of diesel engine: a review // Energies. 2022. Vol. 15, N. 3. P. 1032. doi: 10.3390/en15031032

5. Landwehr K.R., Mead-Hunter R., Kicic A., et al. Toxicity of different biodiesel exhausts in primary human airway epithelial cells grown at air-liquid interface // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 832. P. 155016. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155016
6. Alrashidi A.M.R.N., Adam N.M., Bin Mohd Ariffin M.K.A., et al. Impact of plasma combustion technology on micro gas turbines using biodiesel fuels // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12. N. 9. P. 4321. doi: 10.3390/app12094321
7. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Применение рапсового масла и этанола в дизельном двигателе // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32, № 3. С. 373–389. doi: 10.15507/2658-4123.032.202203.373-389
8. Farokhnia A., Jokar S.M., Parvasi P., Kim A.S. A novel design for biodiesel production from methanol+mutton bone fat mixture // *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2022. Vol. 15, N. 1. P. 1–14. doi: 10.1186/s13068-022-02229-4
9. Sharma P., Chhillar A., Le M.P., et al. Using response surface methodology approach for optimizing performance and emission parameters of diesel engine powered with ternary blend of solketal-biodiesel-diesel // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 52. P. 102343. doi: 10.1016/j.seta.2022.102343
10. Dias L.C., Passeira C., Malça J., Freire F. Integrating life-cycle assessment and multi-criteria decision analysis to compare alternative biodiesel chains // *Annals of Operations Research*. 2022. Vol. 312, N. 2. P. 1359–1374. doi: 10.1007/s10479-016-2329-7
11. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Шишканов Е.А. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля путем их рециркуляции // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2007. № 9. С. 8–9. EDN: HGFVEP
12. Pacheco J.R., Cavalcante R.M., Villardi H.G.D., Young A.F. Biodiesel production through non-conventional supercritical routes: process simulation and technical evaluation // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 251. P. 114998. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114998
13. Goh B.H.H., Chong C.T., Ong H.C., et al. Strategies for fuel property enhancement for second-generation multi-feedstock biodiesel // *Fuel*. 2022. Vol. 315. P. 123178. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123178
14. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля с турбонаддувом путем применения природного газа // *Тракторы и сельхозмашины*. 2010. № 1. С. 11–13. EDN: KYQMOX
15. Demirpolat A.B., Uyar M.M., Arslanoğlu H. Biodiesel fuels produced from poppy and canola oils, experimental investigation of the performance and emission values of the samples obtained by adding new types of nanoparticles // *Petroleum Chemistry*. 2022. Vol. 62, № 4. P. 433–443. doi: 10.1134/s0965544122020190
16. Soni A.K., Kumar S., Pandey M. Performance comparison of microalgae biodiesel blends with petro-diesel on variable compression ratio engine // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*. 2022. Vol. 103, N. 1. P. 53–63. doi: 10.1007/s40034-020-00183-0
17. Paparao J., Murugan S. Dual-fuel diesel engine run with injected pilot biodiesel-diesel fuel blend with inducted oxy-hydrogen (HHO) gas // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47, N. 40. P. 17788–17807. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.235
18. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Чупраков А.И., Юнусов Г.С. Моделирование процессов испарения и смесеобразования в цилиндре тракторного дизеля при работе на этано-топливной эмульсии // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2017. № 1 (31). С. 23–27. EDN: WMOTRM
19. Yadav Kh., Kumar N., Chaudhary R. Effect of synthetic and aromatic amine antioxidants on oxidation stability, performance, and emission analysis of waste cooking oil biodiesel // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29, N. 19. P. 27939–27953. doi: 10.1007/s11356-021-18086-x
20. Gowrishankar S., Krishnasamy A. A relative assessment of emulsification and water injection methods to mitigate higher oxides of nitrogen emissions from biodiesel fueled light-duty diesel engine // *Fuel*. 2022. Vol. 308. P. 121926. doi: 10.1016/j.fuel.2021.121926
21. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование показателей рабочего процесса быстроходного малоразмерного дизеля при работе на этаноле и рапсовом масле // *Двигателестроение*. 2022. № 2 (288). С. 61–71. doi: 10.18698/jec.2022.2.61-71
22. Zandie M., Ng H.K., Gan S., et al. Review of the advances in integrated chemical kinetics-computational fluid dynamics combustion modelling studies of gasoline-biodiesel mixtures // *Transportation Engineering*. 2022. Vol. 7. P. 100102. doi: 10.1016/j.treng.2021.100102
23. Moreira C.A., Faria E.C.M., Queiroz J.E., et al. Structural insights and antioxidant analysis of a tri-methoxy chalcone with potential as a diesel-biodiesel blend additive // *Fuel Processing Technology*. 2022. Vol. 227. P. 107122. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107122
24. Ardebili S.M.S., Kocakulak T., Aytav E., Calam A. Investigation of the effect of JP-8 fuel and biodiesel fuel mixture on engine performance and emissions by experimental and statistical methods // *Energy*. 2022. Vol. 254. P. 124155. doi: 10.1016/j.energy.2022.124155
25. Лиханов В.А., Козлов А.Н. Моделирование сажевыделения в цилиндре дизеля 24 10,5/12,0 при работе на альтернативных топливах. Киров: Вятский ГАТУ, 2019.
26. Mohan chandra kumar O., Simhadri K. Effect of Al2O3 nanoparticle blended mahua oil biodiesel combustion on performance and emission characteristics of CI engine // *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 2022. Vol. 7, N. 3. P. 765–774. doi: 10.1007/s41204-022-00219-3
27. Perumalla Vijaya Kumar, Kumar A.N., Ashok B., et al. Evaluation of performance, emissions and combustion attributes of ci engine using palmyra biodiesel blend with distinct compression ratios, EGR rates and nano-particles // *Fuel*. 2022. Vol. 321. P. 124092. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124092
28. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование токсичности дизельного двигателя при работе на различных альтернативных топливах // *Двигателестроение*. 2023. № 2 (292). С. 54–61. doi: 10.18698/jec.2023.2.54-61
29. Kumar N., Raheman H. Thermal and environmental performance of ci engine using ceo2 nanoparticles as additive in water-diesel-biodiesel fuel blend // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022. Vol. 19. № 4. P. 3287–3304. doi: 10.1007/s13762-021-03262-w
30. Батулин С.А. Физические основы и математическое моделирование процессов сажевыделения и теплового излучения в дизелях: дисс. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1982.

REFERENCES

1. Naeem A, Zaman Sh, Farooq M, et al. Biodiesel production from waste cooking oil employing natural bentonite supported heterogeneous catalyst: waste to biodiesel. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2022;39(6):1450–1459. doi: 10.1007/s11814-022-1068-5
2. Abusweireh RS, Rajamohan N, Vasseghian Y. Enhanced production of biodiesel using nanomaterials: a detailed review on the mechanism and influencing factors. *Fuel*. 2022;319:123862. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123862
3. Lopatin OP. Calculation of the process of nitrogen oxides formation during combustion of methanol in the engine. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Engng.* 2020;919:062011. doi: 10.1088/1757-899X/919/6/062011
4. Lv J, Wang S, Meng B. The effects of nano-additives added to diesel-biodiesel fuel blends on combustion and emission characteristics of diesel engine: a review. *Energies*. 2022;15(3):1032. doi: 10.3390/en15031032
5. Landwehr KR, Mead-Hunter R, Kicic A, et al. Toxicity of different biodiesel exhausts in primary human airway epithelial cells grown at air-liquid interface. *Science of the Total Environment*. 2022;832:155016. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155016
6. Alrashidi AMRN, Adam NM, Bin Mohd Ariffin MKA, et al. Impact of plasma combustion technology on micro gas turbines using biodiesel fuels. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022;12(9):4321. doi: 10.3390/app12094321
7. Lihanov VA, Lopatin OP. Primenenie rapsovogo masla i jetanola v dizel'nom dvigatele. *Inzhenerye tehnologii i sistemy*. 2022;32(3):373–389. (In Russ.) doi: 10.15507/2658-4123.032.202203.373-389
8. Farokhnia A, Jokar SM, Parvasi P, Kim AS. A novel design for biodiesel production from methanol+mutton bone fat mixture. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2022;15(1):1–14. doi: 10.1186/s13068-022-02229-4
9. Sharma P, Chhillar A, Le MP, et al. Using response surface methodology approach for optimizing performance and emission parameters of diesel engine powered with ternary blend of solketal-biodiesel-diesel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;52:102343. doi: 10.1016/j.seta.2022.102343
10. Dias LC, Passeira C, Malça J, Freire F. Integrating life-cycle assessment and multi-criteria decision analysis to compare alternative biodiesel chains. *Annals of Operations Research*. 2022;312(2):1359–1374. doi: 10.1007/s10479-016-2329-7
11. Lihanov VA, Lopatin OP, Shishkanov EA. Snizhenie soderzhanija oksidov azota v otrabotavshih gazah dizelja putem ih recirkuljacii. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2007;9:8–9. (In Russ.) EDN: HGFVEP
12. Pacheco JR, Cavalcante RM, Villardi HGD, Young AF. Biodiesel production through non-conventional supercritical routes: process simulation and technical evaluation. *Energy Conversion and Management*. 2022;251:114998. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114998
13. Goh BHH, Chong CT, Ong HC, et al. Strategies for fuel property enhancement for second-generation multi-feedstock biodiesel. *Fuel*. 2022;315:123178. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123178
14. Lihanov VA, Lopatin OP. Snizhenie soderzhanija oksidov azota v otrabotavshih gazah dizelja s turbonadduvom putem primeneniya prirodnogo gaza. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2010;1:11–13. (In Russ.) EDN: KYQMOX
15. Demirpolat AB, Uyar MM, Arslanoğlu H. Biodiesel fuels produced from poppy and canola oils, experimental investigation of the performance and emission values of the samples obtained by adding new types of nanoparticles. *Petroleum Chemistry*. 2022;62(4):433–443. doi: 10.1134/s0965544122020190
16. Soni AK, Kumar S, Pandey M. Performance comparison of microalgae biodiesel blends with petro-diesel on variable compression ratio engine. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*. 2022;103(1):53–63. doi: 10.1007/s40034-020-00183-0
17. Paparao J, Murugan S. Dual-fuel diesel engine run with injected pilot biodiesel-diesel fuel blend with inducted oxy-hydrogen (HHO) gas. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(40):17788–17807. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.235
18. Lihanov VA, Lopatin OP, Chuprakov AI, Junusov GS. Modelirovanie processov isparenija i smeseobrazovanija v cilindre traktornogo dizelja pri rabote na jetanolo-toplivoj jemul'sii. *Izvestija MGTU «MAMI»*. 2017;1(31):23–27. (In Russ.) EDN: WMOTRM
19. Yadav Kh, Kumar N, Chaudhary R. Effect of synthetic and aromatic amine antioxidants on oxidation stability, performance, and emission analysis of waste cooking oil biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(19):27939–27953. doi: 10.1007/s11356-021-18086-x
20. Gowrishankar S, Krishnasamy A. A relative assessment of emulsification and water injection methods to mitigate higher oxides of nitrogen emissions from biodiesel fueled light-duty diesel engine. *Fuel*. 2022;308:121926. doi: 10.1016/j.fuel.2021.121926
21. Lihanov VA, Lopatin OP. Issledovanie pokazatelej rabochego processa bystrohodnogo malorazmernogo dizelja pri rabote na jetanole i rapsovom masle. *Dvigatelsestroenie*. 2022;2(288):61–71. (In Russ.) doi: 10.18698/jec.2022.2.61-71
22. Zandie M, Ng HK, Gan S, et al. Review of the advances in integrated chemical kinetics-computational fluid dynamics combustion modelling studies of gasoline-biodiesel mixtures. *Transportation Engineering*. 2022;7:100102. doi: 10.1016/j.treng.2021.100102
23. Moreira CA, Faria ECM, Queiroz JE, et al. Structural insights and antioxidant analysis of a tri-methoxy chalcone with potential as a diesel-biodiesel blend additive. *Fuel Processing Technology*. 2022;227:107122. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107122
24. Ardebili SMS, Kocakulak T, Aytav E, Calam A. Investigation of the effect of JP-8 fuel and biodiesel fuel mixture on engine performance and emissions by experimental and statistical methods. *Energy*. 2022;254:124155. doi: 10.1016/j.energy.2022.124155
25. Lihanov VA, Kozlov AN. Modelirovanie sazhevydelenija v cilindre dizelja 2Ch 10,5/12,0 pri rabote na al'ternativnyh toplivah. Kirov: Vjatskij GATU; 2019. (In Russ.)
26. Mohan chandra kumar O., Simhadri K. Effect of Al2O3 nanoparticle blended mahua oil biodiesel combustion on performance and emission characteristics of CI engine. *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 2022;7(3):765–774. doi: 10.1007/s41204-022-00219-3
27. Perumalla Vijaya Kumar, Kumar AN, Ashok B, et al. Evaluation of performance, emissions and combustion attributes of ci engine using palmyra biodiesel blend with distinct compression ratios, EGR rates and nano-particles. *Fuel*. 2022;321:124092. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124092

28. Lihanov VA, Lopatin OP. Issledovanie toksichnosti dizel'nogo dvigatelja pri rabote na razlichnyh al'ternativnyh toplivah. *Dvigatelsestroenie*. 2023;2(292):54–61. (In Russ.) doi: 10.18698/jec.2023.2.54-61
29. Kumar N, Rahman H. Thermal and environmental performance of ci engine using ceo2 nanoparticles as additive

- in water–diesel–biodiesel fuel blend. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19(4):3287–3304. doi: 10.1007/s13762-021-03262-w
30. Baturin SA. Fizicheskie osnovy i matematicheskoe modelirovanie processov sazhevydelenija i teplovogo izluchenija v dizeljah [dissertation] Leningrad; 1982. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* Лопатин Олег Петрович,

д-р техн. наук,
профессор кафедры тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов;
адрес: Российская Федерация, 610017, Киров,
Октябрьский пр-т, д. 133;
ORCID: 0000-0002-0806-6878;
eLibrary SPIN: 8716-0189;
e-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Лиханов Виталий Анатольевич,

профессор, д-р техн. наук,
заведующий кафедрой тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов;
ORCID: 0000-0003-3033-7176;
eLibrary SPIN: 9474-7629;
e-mail: lihanov.va@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Oleg P. Lopatin,

Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Heat Engines, Automobiles
and Tractors Department;
address: 133 Oktyabrsky avenue, 610017 Kirov,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-0806-6878;
eLibrary SPIN: 8716-0189;
e-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Vitaly A. Likhonov,

Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Head of the Heat Engines, Automobiles
and Tractors Department;
ORCID: 0000-0003-3033-7176;
eLibrary SPIN: 9474-7629;
e-mail: lihanov.va@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author