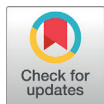


**МАШИНОСТРОЕНИЕ /
MECHANICAL ENGINEERING**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.392-415>EDN: <https://elibrary.ru/usrogr>

УДК / UDK 621.436.1

*Оригинальная статья / Original article***Снижение дымности и сажеобразования
в дизельном двигателе при полном замещении
нефтяного топлива метанолом и метиловым
эфиром рапсового масла****В. А. Лиханов, О. П. Лопатин** *Вятский государственный агротехнологический университет,
г. Киров, Российская Федерация* *nirs_vsaa@mail.ru**Аннотация*

Введение. Характеристики дизельного топлива, включая его химический состав и физико-химические свойства, напрямую коррелируют с экологическими аспектами работы двигателя. Они определяют интенсивность образования сажи в процессе сгорания и объем ее выбросов в атмосферу с отработавшими газами. При эксплуатации двигателя с альтернативным биотопливом на разных нагрузочных и скоростных режимах условия горения топлива в цилиндре дизеля изменяются в зависимости от параметров впрыскивания и распыливания, размера капель, что приводит к модификации характеристик сажевыделения. Актуальность научного исследования процесса сажеобразования в дизельных двигателях, работающих на биотопливе, обусловлена его непосредственным влиянием на эффективность сгорания, уровень токсичных выбросов, а также на экономические и экологические характеристики двигателя.

Цель исследования. Изучить влияние метанола и метилового эфира рапсового масла на образование сажи и уменьшение дымности отработавших газов дизельного двигателя.

Материалы и методы. Адекватность и современность методов обработки опытных данных подтверждается экспериментальными исследованиями и аналитическими зависимостями. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с ГОСТ 18509-88, отбор проб для определения дымности отработавших газов – ГОСТ 24028-2013, ГОСТ 17.2.2.02-98, ГОСТ Р 41.24-2003. Показатели процесса сгорания определялись по методике Центрального научно-исследовательского дизельного института, расчетные характеристики сажи по методике Центрального научно-исследовательского дизельного института, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и программам Вятского государственного агротехнологического университета.

© Лиханов В. А., Лопатин О. П., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования. Изучена морфология и микроструктура агрегатных сажевых частиц. Рассмотрены физико-химические характеристики применяемых в дизельном двигателе топлив. На основных эксплуатационных нагрузочных и скоростных режимах дизельного двигателя, работающего на метаноле и метиловом эфире рапсового масла, получены значения дымности отработавших газов, определены температуры в зонах образования и выгорания сажи, количество и диаметр частиц сажи, массовое содержание и концентрация сажи. Получены их максимальные значения с определением соответствующего им угла поворота коленчатого вала. Успешно осуществлено полное замещение стандартного нефтяного дизельного топлива в дизельных двигателях метанолом и метиловым эфиром рапсового масла.

Обсуждение и заключение. Подтверждается возможность полного замещения штатного топлива в дизельном двигателе метанолом и метиловым эфиром рапсового масла с существенным снижением дымности отработавших газов. Полученные расчетные значения концентрации сажи в цилиндре соответствуют актуальным теоретическим моделям, описывающим процессы внутри цилиндра, и находят подтверждение в экспериментальных данных по измерению дымности отработавших газов. Дальнейшие направления исследований могут включать адаптацию используемого альтернативного топлива и оптимизацию системы топливоподачи дизельного двигателя для достижения минимально возможного уровня дымности отработавших газов.

Ключевые слова: сажеобразование, частицы сажи, дымность отработавших газов, дизельный двигатель, метанол, метиловый эфир рапсового масла

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лиханов В.А., Лопатин О.П. Снижение дымности и сажеобразования в дизельном двигателе при полном замещении нефтяного топлива метанолом и метиловым эфиром рапсового масла. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):392–415. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.392-415>

Reduction of Smoke and Soot Formation in a Diesel Engine by Replacing Completely Petroleum Fuel with Methanol and Methyl Ester of Rapeseed Oil

V. A. Likhanov, O. P. Lopatin 

*Yatka State Agrotechnological University,
Kirov, Russian Federation*

 *nirs_vsaa@mail.ru*

Abstract

Introduction. The characteristics of diesel fuel, including its chemical composition and physico-chemical properties, directly correlate with the engine operation environmental aspects. They determine the soot formation intensity in combusting and soot emissions into the atmosphere with exhaust gases. When an engine operates using alternative biofuels in different load and speed modes, the fuel combustion conditions in the diesel cylinder vary depending on the injection and spraying parameters and the droplet size of the biofuel used that leads to the modification of the soot emission characteristics. The relevance of studying the soot formation in diesel biofuel-powered engines is caused by its direct effect on combustion efficiency, the level of toxic emissions, and on the economic and environmental engine characteristics.

Aim of the Study. The study is aimed at investigating the effect of methanol and methyl ester of rapeseed oil on forming soot and reducing smoke content of diesel engine exhaust gases.

Materials and Methods. The adequacy and topicality of experimental data processing methods is confirmed by experimental studies and analytical dependencies. Experimental studies were conducted according to the GOST 18509-88 methodology, the samples to determine the smoke content of exhaust gases were taken according to the GOST 24028-2013, GOST 17.2.2.02-98, GOST R 41.24-2003 methods. The parameters of the combustion process were determined according to the methods of the Central Scientific Research Diesel Institute, the calculated characteristics of soot were determined according to the Central Research Diesel Institute, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University methods and the Vyatka State Agrotechnological University programs.

Results. There have been studied the morphology and microstructure of aggregate soot particles. There have been considered the physicochemical characteristics of the fuels used in a diesel engine. When operating in the main load and speed modes of a diesel engine running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, there have been found exhaust smoke values, temperatures in the zones of soot formation and burnout, the number and diameter of soot particles, the mass content and concentration of soot. There have been also found their maximum values and has been determined the corresponding angle of crankshaft rotation. In the course of the study, the complete replacement of standard petroleum diesel fuel in diesel engines with methanol and methyl ester of rapeseed oil was successfully carried out.

Discussion and Conclusion. The study confirms the possibility to replace completely the standard fuel for the diesel engine with methanol and methyl ester of rapeseed oil that reduces significantly exhaust smoke. The calculated values of the soot concentration in the cylinder correspond to current theoretical models describing the processes occurring inside the cylinder, and are confirmed by the experimental data of the exhaust smoke measurements. Further research areas may include adapting the alternative fuel used and optimizing the fuel supply system of a diesel engine to achieve the lowest possible level of exhaust smoke.

Keywords: soot formation, soot particles, exhaust smoke, diesel engine, methanol, methyl ester of rapeseed oil

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

For citation: Likhanov V.A., Lopatin O.P. Reduction of Smoke and Soot Formation in a Diesel Engine by Replacing Completely Petroleum Fuel with Methanol and Methyl Ester of Rapeseed Oil. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):392–415. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.392-415>

ВВЕДЕНИЕ

В общем энергетическом балансе процесса горения сажа считается нежелательным продуктом как с экономической, так и с экологической точки зрения. В то же время в ряде отраслей сажа представляет собой ключевой продукт горения, что обуславливает неизменный научный интерес к процессам ее формирования [1; 2]. Несмотря на противоположные задачи (снижение и увеличение образования сажи) фундаментальные физико-химические принципы, лежащие в основе этого явления, во многом схожи. Общий базис позволяет эффективно применять накопленные знания из различных направлений науки о горении, формируя единую и надежную фундаментальную базу при изучении сажеобразо-

вания и решить важнейшую задачу – снизить дымность отработавших газов (ОГ) дизельного двигателя (ДД).

Предложенный комплексный подход особенно актуален при анализе процессов сгорания в ДД, работающих на новых и альтернативных видах топлива. Это обусловлено тем, что многостадийный механизм образования сажи требует глубокого понимания физико-химических закономерностей для оптимизации работы современных энергетических установок [3; 4]. Кроме того, в условиях урбанизированных территорий, характеризующихся высокой концентрацией транспортных средств, выбросы сажи представляют собой серьезные локальные экологические проблемы. Они негативно влияют на качество воздуха и здоровье населения, в частности, на респираторную систему. Следовательно, глубокое изучение механизмов сажеобразования и ее эмиссии с отработавшими газами ДД имеет первостепенное значение для практической деятельности и развития отрасли науки в целом.

По своим показателям применимости и доступности биодизельный двигатель сопоставим с классическим дизельным, поскольку биодизельное топливо, характеризующееся необходимыми экологическими параметрами, обладает тенденцией к доступности и совместимости с существующим нефтяным дизельным топливом (ДТ).

В современных условиях технологического развития для производства биотоплива достаточно действующей инфраструктуры и существующего уровня развития аграрного сектора экономики. Таким образом, использование ДД, работающих на биотопливе, актуально как в транспортном секторе, так и в агропромышленной сфере. Следовательно, такое топливо можно рассматривать как часть решения проблемы снижения дымности ОГ ДД и улучшения экологии [5; 6].

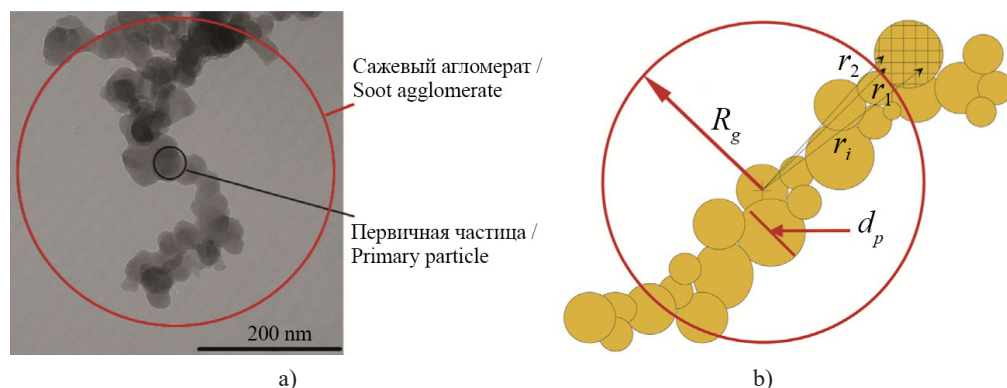
Целью исследования является определение сажевыделения и снижение дымности отработавших газов дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла (МЭРМ).

Физико-химические характеристики исследуемого биотоплива предположительно отличаются от штатного, поэтому даже на первом этапе его применения необходимо учитывать плотность и вязкость используемого топлива. Данные показатели оказывают влияние на определяющие с точки зрения образования сажи параметры впрыскивания и распыливания в ДД [7; 8].

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Интенсивные научные исследования посвящены физико-химическим свойствам сажи. Современные аналитические методы, включая просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения, рентгеноскопию, спектроскопию, газовую хроматографию, а также контактные и оптические методы, позволили за последние десятилетия детально изучить размеры, структуру и физико-химические характеристики сажи [9; 10].

Для изучения и описания рабочих процессов сажеобразования особый интерес представляют показатели морфологии и микроструктуры ее агрегатных частиц, представленные на рисунке 1 [11].



Р и с. 1. Схема сажевых частиц:

- а) изображения отобранных первичных частиц;
 б) схема определения среднего диаметра первичных частиц

F i g. 1. Diagram of soot particles:

- а) images of selected primary particles;
 б) scheme for determining the average diameter of primary particles

Примечание: R_g – радиус инерции (гирации) агрегата, нм; d_p – средний диаметр первичной частицы, нм; r_1, r_2, r_i – расстояния 1, 2 и i -той частицы до общего центра масс, нм.

Note: R_g is the radius of inertia (gyration) of the aggregate, characterizing the spatial distribution of the mass of the primary particles relative to the center of mass of the aggregate, nm; d_p is the average diameter of the primary particle, nm; r_1, r_2, r_i are the distances of the 1st, 2nd and i -th particle to the common center of mass, nm.

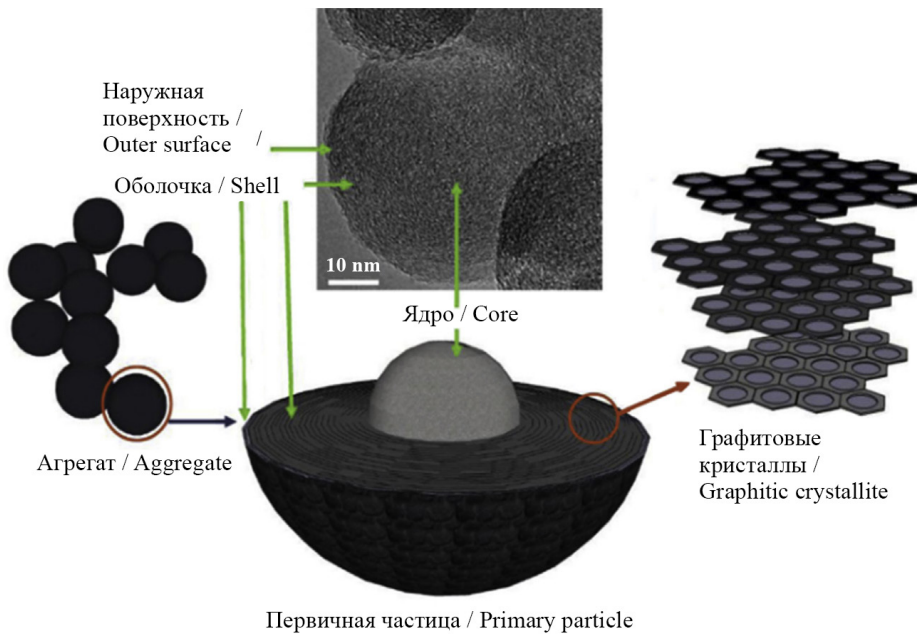
Источник: рисунки 1–3 взяты из статьи [11].

Source: figures 1–3 are taken from the article [11].

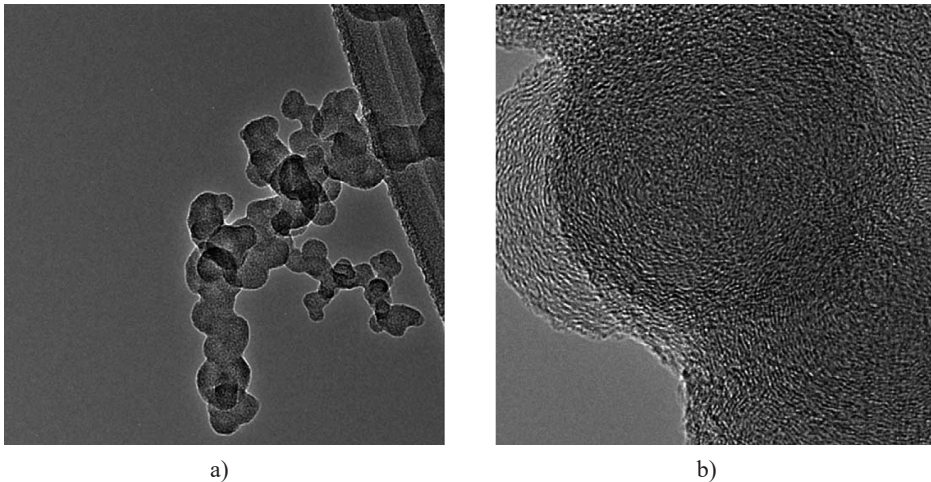
На основе представленной на рисунке 1 схемы базируется метод анализа изображений для определения размеров первичных частиц d_p и параметров отобранных сажевых агрегатов [12; 13].

На рисунке 2 изображены (в наномасштабе) отдельные части первичной частицы сажи – внутреннее ядро и его внешняя оболочка [14; 15].

Согласно исследованию авторского коллектива из Польши [14], структура частиц характеризуется наличием внутреннего ядра, состоящего из множества мелких частиц с собственным ядром, которые, в свою очередь, покрыты углеродными слоями турбостратной структуры. Внешняя оболочка образована графитовыми кристаллитами, ориентированными параллельно внешней поверхности, что согласуется с данными просвечивающей электронной микроскопии, представленными на рисунке 3 [16]. При этом остается дискуссионным вопрос о природе первичного зародыша частицы: являются ли им полициклические ароматические углеводороды или ацетилен.



Р и с. 2. Структура первичной частицы сажи при горении дизельного топлива
 Fig. 2. The structure of the primary soot particle during the combustion of diesel fuel



Р и с. 3. Микрофотографии частиц сажи: а) агломерат; б) первичная частица
 Fig. 3. Micrographs of soot particles: a) agglomerate; b) primary particle

Таким образом, учитывая данные предыдущих исследований [14–16], можно предположить, что при сгорании биотоплива возможно присутствие на ранних стадиях образования достаточного количества различных алифатических соединений, что будет в большей степени свидетельствовать в пользу ацетиленовой теории,

предполагающей более активное вовлечение ацетилена как в начальные стадии формирования сажевых частиц, так и в последующий рост их поверхности [17; 18].

Анализ исследований по применению биотоплива свидетельствует о сокращении дымности ОГ, а также основного спектра загрязняющих атмосферу веществ [19; 20]. Наиболее существенное снижение зафиксировано при увеличении доли применяемого метанола в топливе, что не зависит от способа подачи метанола в зону сгорания¹ [21; 22].

На сегодняшний день известно три метода введения метанола для ДД Д-2156-МТН-8, устанавливаемого на грузовые автомобили². Метанол дозируется в виде спирто-топливной эмульсии на стадии впуска, используя форсуночную систему и вспомогательный насос. Важно отметить, что использование метанола в эмульгированном состоянии приводит к значительному снижению содержания как сажи, так и оксидов азота NO_x в ОГ.

В исследованиях В. А. Лиханова и А. М. Сайкина метанол подается на впуске ДД³. Ученые отметили снижение дымности ОГ на 20 % при замещении 15 % ДТ, а при замещении 30 % снижение дымности уже составило 40 %. Также было описано впрыскивание метанола сразу в камеру сгорания ДД, что привело к снижению дымности ОГ минимум в 2 раза [22].

Были проведены исследования по применению диссоциированного метанола в ДД 6ЧН 12/14 в качестве дополнительного топлива, подаваемого перед турбиной. Процесс включал предварительное испарение метанола за счет тепловой энергии ОГ и его последующее каталитическое разложение. Результаты экспериментов продемонстрировали существенное снижение концентрации сажи и углеводородов СН_x в ОГ⁴.

Коллектив ученых из Польши и Венгрии рассмотрел спиртосодержащее топливо, состоящее из 85 % этанола и 15 % ДТ. Они осуществляли впрыск во впускной коллектор пропорционально энергетической составляющей по отношению к штатному топливу в размере от 20 до 90 %. Отмечено существенное снижение дымности ОГ в размере 90 % при максимальном замещении штатного ДТ [23].

Представленные исследования доказывают, что применение в ДД метанола приводит к значительному уменьшению в ОГ сажи, что также может быть подтверждением вывода о наличии кислорода в метаноле, позволяющее достичь эффекта снижения дымности ОГ.

Отечественные исследователи предлагают использование МЭРМ вместо традиционного штатного ДТ для снижения выбросов сажи [24; 25]. Так, В. А. Марков, А. А. Зенин и С. Н. Девянин для ДД Д-245.12С установили оптимальный в плане достижения экологического эффекта состав биотоплива, замещающий 40 % МЭРМ

¹ Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. М.: Колос; 1994. 224 с. <https://elibrary.ru/wlnskz>

² Там же.

³ Там же.

⁴ Лиханов В.А., Лопатин О.П. Использование природного газа, спиртов и топлив на их основе в дизельных двигателях. Киров: Вятская ГСХА; 2018. 395 с. <https://elibrary.ru/xoywax>

в общем количестве штатного ДТ [26]. Однако ученые Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана указывают, что такой состав топлива ограничен ухудшением показателей процесса сгорания, поэтому процент замещения нефтяного топлива нецелесообразно увеличивать⁵.

Проведено исследование ДД УК-2 при работе на рапсовом масле и МЭРМ. Так, отмечены хорошие показатели по снижению дымности ОГ при вынужденном ограничении процента замещения штатного топлива МЭРМ вследствие увеличения расхода топлива, вызванного большей вязкостью применяемого биотоплива⁶.

Результаты обзора литературы научных исследований доказывают надежное снижение содержания сажи в отработавших газах ДД за счет применения в качестве топлива метанола и МЭРМ. Однако основной проблемой для полного замещения штатного ДТ являются физико-химические свойства применяемых биотоплив (табл. 1 и 2), ухудшающие параметры процесса сгорания ДД, что влияет на процессы топливоподачи и распыливания [27].

Т а б л и ц а 1

Table 1

Сравнительные физико-химические характеристики исследуемых топлив [28]

Comparative physico-chemical characteristics of the studied fuels [28]

Свойства / Features	Топливо / Fuel		
	Дизельное топливо / Diesel fuel	Рапсовое масло / Rapeseed oil	Метиловый эфир рапсового масла / Methyl ester of rapeseed oil
Элементарный состав, кг/кг; / Elementary composition, kg/kg			
углерод / Carbon	0,87	0,77	0,78
водород / Hydrogen	0,13	0,12	0,13
кислород / Oxygen	—	0,11	0,09
Плотность при 15 °С, кг/м ³ / Density at 15 °C, kg/m ³	863	877	860–900
Теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, кг воздуха/кг топлива / Theoretical amount of air required for complete combustion of 1 kg of fuel, kg of air/kg of fuel	14,35	12,50	12,70
Поверхностное натяжение, Н/м при 20 °С / Surface tension, N/m at 20 °C	27,1·10 ⁻³	33,2·10 ⁻³	30,7·10 ⁻³
Температура вспышки, °С / Flash point, °C	35–80	100	120
Вязкость при 20 °С, мм ² /с, (сСт) / Viscosity at 20 °C, mm ² /s, (cSt)	3,0–6,0	80	12
Теплота сгорания, кДж/кг / Heat of combustion, kJ/kg	42 530	36 700	37 200
Цетановое число / The cetane number	45	44	51

⁵ Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2002. 376 с. <https://elibrary.ru/qceidv>

⁶ Лиханов В.А., Лопатин О.П. Использование природного газа, спиртов и топлив на их основе в дизельных двигателях.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Физико-химические характеристики метанола⁷
Physico-chemical characteristics of methanol

Наименование показателя / Naming of the indicator	Значение / Meaning
Внешний вид / Appearance	Бесцветная прозрачная жидкость без нерастворимых примесей / Colorless transparent liquid without insoluble impurities
Массовая доля этилового спирта, %, не более / Mass fraction of ethyl alcohol, %, max	0,01
Плотность при 20 °С, г/см ³ / Density at 20 °С, g/cm ³	0,791–0,792
Массовая доля нелетучего остатка после испарения, %, не более / Mass fraction of non-volatile residue after evaporation, %, max	0,001
Температурные пределы: / Temperature limits: – предел кипения, °С / Boiling point, °С – 99 % продукта перегоняется в пределах, °С, не более / 99% of the product is distilled within, °С, no more	64,0–65,5 0,8
Массовая доля хлора, %, не более / Mass fraction of chlorine, %, max	0,0001
Массовая доля аммиака и аминокислот в пересчете на аммиак, %, не более / Mass fraction of ammonia and amino compounds in terms of ammonia, %, max	0,00001
Испытания с перманганатом калия, мин, не менее / Tests with potassium permanganate, min, not less	60
Массовая доля серы, %, не более / Mass fraction of sulfur, %, max	0,0001
Массовая доля летучих соединений железа в пересчете на железо, %, не более / Mass fraction of volatile iron compounds in terms of iron, %, max	0,00001
Массовая доля альдегидов и кетонов в пересчете на ацетон, %, не более / Mass fraction of aldehydes and ketones in terms of acetone, %, max	0,003
Массовая доля свободных кислот в пересчете на муравьиную кислоту, %, не более / Mass fraction of free acids in terms of formic acid, %, max	0,0015
Массовая доля воды, %, не более / Mass fraction of water, %, max	0,05

Применение метанола и МЭРМ в ДД может позволить минимизировать не только выбросы сажи, но и основные вредные вещества CO, NO_x, CH_x, а также полностью исключить необходимость применения нефтяного ДТ. Использование биодизельного топлива возможно сократит выбросы твердых частиц и дымность ОГ и, следовательно, улучшит экологические показатели ДД [29; 30].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Для проведения испытаний был задействован двухцилиндровый ДД воздушного охлаждения 2Ч 10,5/12,0. Данный двигатель, произведенный Владимирским моторо-тракторным заводом, оснащен неразделенной полусферической камерой сгорания в поршне (рис. 4).

⁷ Лопатин О.П. Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения содержания оксидов азота в дизеле: дис. ... д-ра. техн. наук. Киров; 2020. 458 с. <https://elibrary.ru/dzkskn>



Р и с. 4. Объект исследования

F i g. 4. The object of the study

Источник: фотографии для рисунков 4, 6 были сделаны В. А. Лихановым в лаборатории кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского ГАТУ (г. Киров, Россия).

Source: the photographs for figures 4 and 6 were taken by V. A. Likhanov in the laboratory of the Department of Thermal Engines of Automobiles and Tractors of Vyatka State Agrotechnological University (Kirov, Russia).

Методы, оборудование и процедура исследования

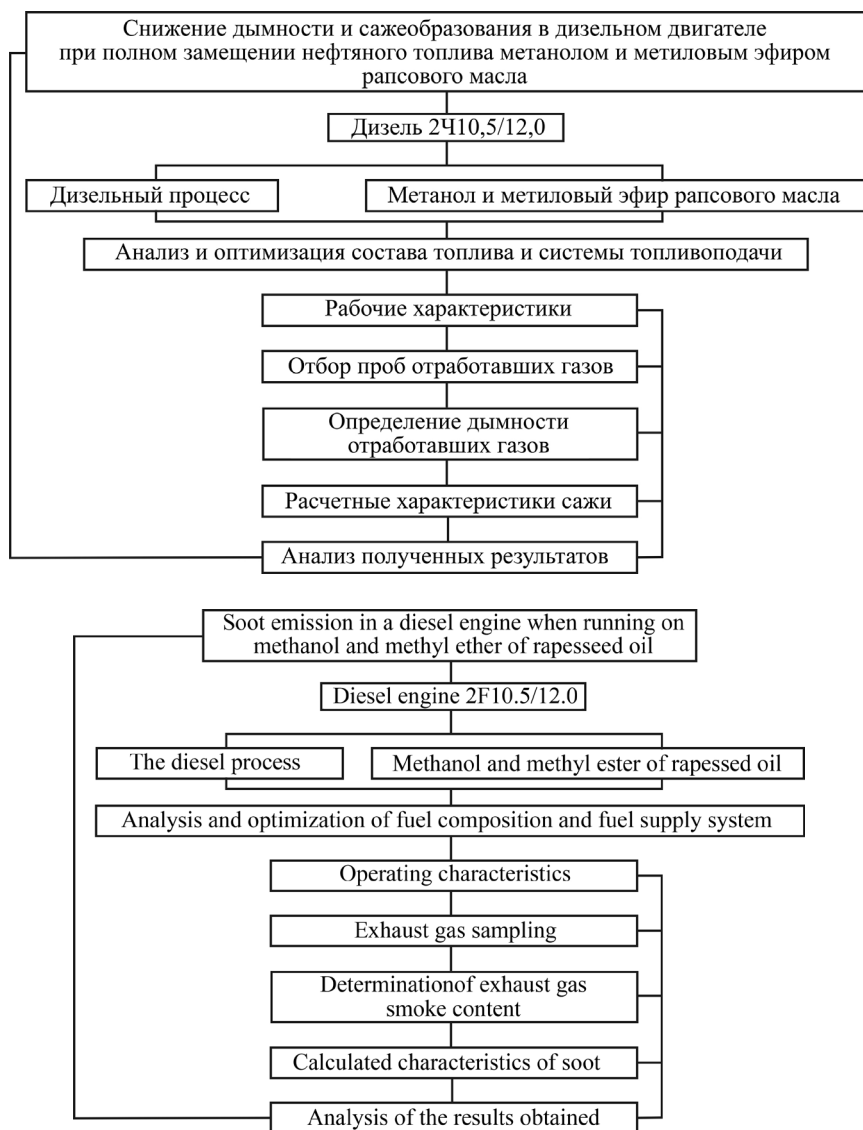
Исследования были проведены на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

Характеристика проведенного исследования включает в себя несколько последовательно проведенных этапов, схематично изображенных на рисунке 5.

В качестве инициатора горения (пилотного топлива) был задействован МЭРМ, физико-химические характеристики которого обеспечивали его самовоспламенение в ДД [31; 32].

На первом этапе осуществляли анализ и оптимизацию состава топлива и системы топливоподачи. В ДД была применена гибридная система подачи топлива. Метанол, как основное топливо, поступал через стандартный топливный контур, а для обеспечения воспламенения (пилотный режим) использовался МЭРМ, для которого была предусмотрена отдельная система. Эта система включала штифтовые форсунки (ФШ–6–2×25), топливный насос высокого давления 2 УТНМ, а также необходимые топливопроводы, фильтр и отдельный топливный бак. Процесс запуска и прогрева двигателя проходил на МЭРМ, после чего начинался впрыск метанола, а расход МЭРМ снижался до минимального значения, необходимого для устойчивой работы. После установления рабочего режима, цикловая подача МЭРМ

оставалась постоянной (12 %), в то время как метанол составлял 88 % от общего объема подаваемого топлива. Регулировку рабочих параметров ДД осуществляли путем изменения величины цикловой подачи метанола⁸.



Р и с. 5. Схема проведения исследования

F i g. 5. The scheme of the study

Источник: рисунок 5 составлен авторами статьи в программе CorelDRAW.

Source: figure 5 was compiled by the authors of the article in the program CorelDRAW.

⁸ Лиханов В.А., Лопатин О.П. Использование природного газа, спиртов и топлив на их основе в дизельных двигателях.

На втором этапе экспериментально был выполнен комплекс мероприятий по снятию рабочих характеристик двигателя с отбором проб ОГ и определением дымности. Снятие всех рабочих характеристик с двигателя (регулирующих, нагрузочных, скоростных) проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 18509-88⁹. Для снятия характеристик был использован электротормозной стенд SAK-N670 с интегрированной балансирной маятниковой машиной (рис. 6).



Р и с. 6. Пульт управления экспериментальной установкой

F i g. 6. Experimental installation control panel

Отбор проб и определение дымности ОГ выполняли с помощью прибора Bosch EFAW-68A по методикам ГОСТ 24028-2013¹⁰, ГОСТ 17.2.2.02-98¹¹, ГОСТ Р 41.24-2003¹².

Третий этап включал в себя выполнение расчетных характеристик сажи. В зависимости от изменения угла ϕ ПКВ были определены: температура T в зонах образования и выгорания сажи, количество частиц сажи, их текущий среднемассовый диаметр, массовое содержание и концентрация сажи в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ. Далее в зависимости от изменения нагрузки определяли максимальное число частиц сажи, содержание сажи и соответствующие этим значениям углы ПКВ, концентрацию, массу, диаметр и количество частиц сажи в ОГ.

На четвертом этапе выполнялся анализ полученных результатов и оптимизация работы двигателя. Полученные расчетные значения сажи в цилиндре соответствуют актуальным теоретическим моделям, которые описывают протекающие внутри цилиндра процессы и подтверждаются в экспериментальными данными

⁹ ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010002> (дата обращения: 03.06.2025).

¹⁰ ГОСТ 24028-2013. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104200> (дата обращения: 03.06.2025).

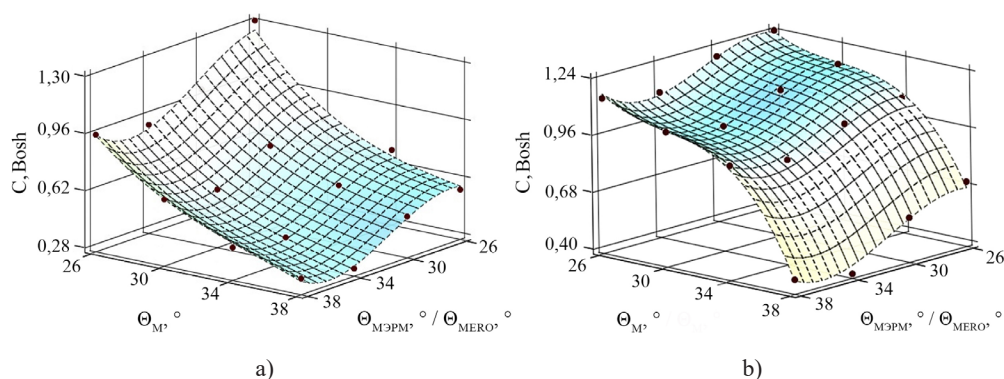
¹¹ ГОСТ 17.2.2.02-98. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012788> (дата обращения: 03.06.2025).

¹² ГОСТ Р 41.24-2003. Правила ЕЭК ООН N 24. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034424> (дата обращения: 03.06.2025).

по измерению дымности ОГ. Оптимизации работы двигателя для максимального КПД под нагрузкой достигали путем установки минимальной, но достаточной для устойчивой работы на низких оборотах и холостом ходу, запальной порции топлива. Было установлено, что размер запальной порции в 9,7 мг/цикл при номинальной частоте вращения 1800 мин⁻¹ (что соответствует часовому расходу 1,05 кг/ч) удовлетворяет этим условиям. Дальнейшее снижение запальной порции вызывало неравномерность работы ДД¹³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 7 представлены экспериментальные результаты дымности отработавших газов ДД при работе на метаноле и МЭРМ на различных установочных углах опережения впрыскивания топлива ($\Theta_{\text{МЭРМ}}$ – МЭРМ, $\Theta_{\text{М}}$ – метанола).



Р и с. 7. Дымность отработавших газов дизельного двигателя 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла в зависимости от изменения установочных углов опережения впрыскивания:

а) $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,587 \text{ МПа}$; б) $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,594 \text{ МПа}$

Fig. 7. Smoke content of exhaust gases in the diesel engine 2F 10.5/12.0 when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on changes in the setting angles of injection advance:

а) $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0.587 \text{ МПа}$; б) $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0.594 \text{ МПа}$

Примечание: n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; p_e – среднее эффективное давление, МПа.

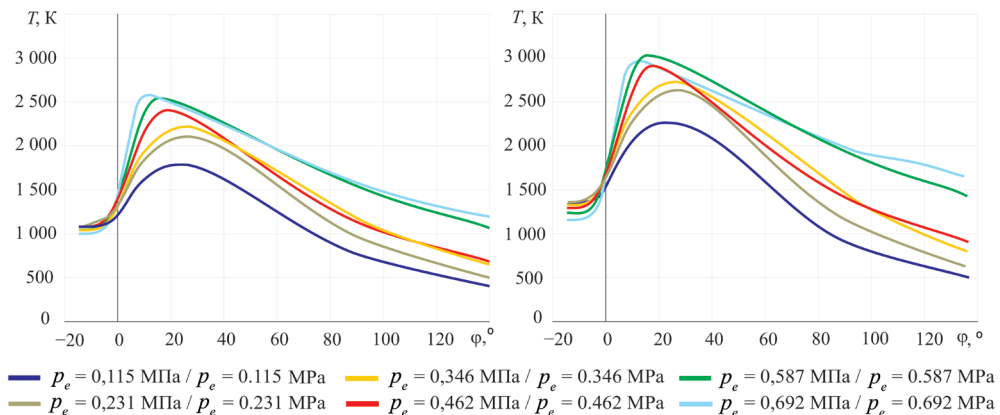
Note: n – is the speed of rotation of the crankshaft, min⁻¹; p_e – is the average effective pressure, MPa.

Источник: графики для рисунков 7–14 составлены авторами статьи в программе CorelDRAW.

Source: the graphs for figures 7–14 were compiled by the authors of the article in the CorelDRAW program.

На рисунке 8 представлены расчетные характеристики температуры в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ).

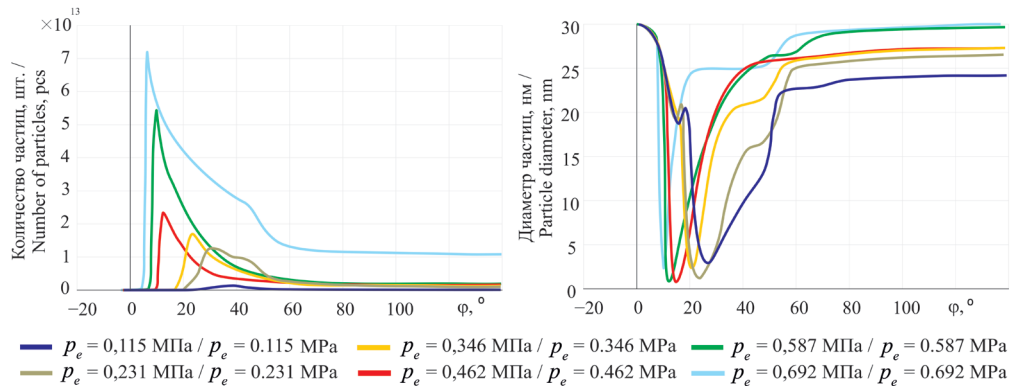
¹³ Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей.



Р и с. 8. Расчетные характеристики температуры T в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла в зависимости от угла φ поворота коленчатого вала при $n = 1\,800 \text{ мин}^{-1}$: а) в зоне образования сажи; б) в зоне выгорания сажи

F i g. 8. Calculated characteristics of the temperature T in the cylinder of a diesel engine when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on the angle φ of rotation of the crankshaft at $n = 1,800 \text{ min}^{-1}$: а) in the zone of soot formation; б) in the zone of soot burnout

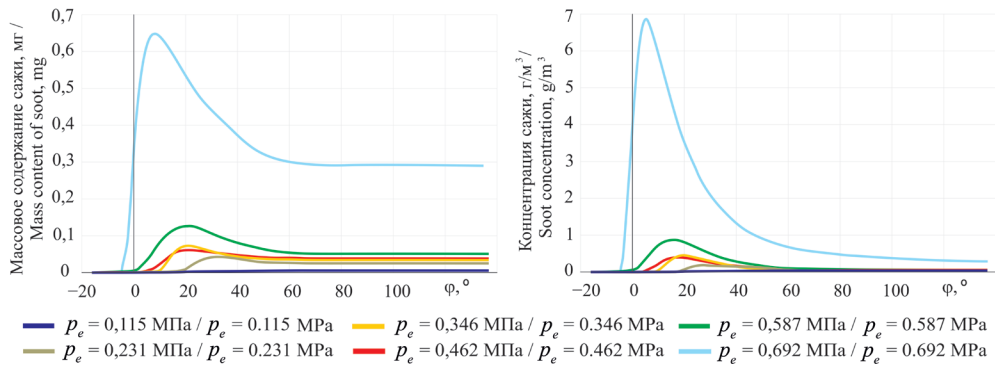
Расчетные характеристики частиц сажи в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от угла ПКВ представлены на рисунке 9.



Р и с. 9. Расчетные характеристики частиц сажи в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла в зависимости от изменения угла φ поворота коленчатого вала при $n = 1\,800 \text{ мин}^{-1}$: а) количество частиц сажи, шт; б) текущий среднемассовый диаметр частиц, нм

F i g. 9. Calculated characteristics of soot particles in a diesel engine cylinder when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on the change in the angle φ of rotation of the crankshaft at $n = 1,800 \text{ min}^{-1}$: а) the number of soot particles, pcs; б) the current average mass particle diameter, nm

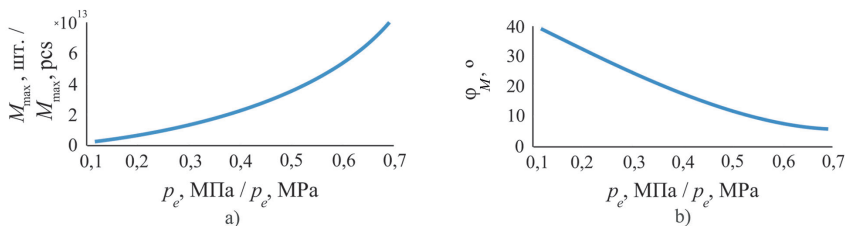
На рисунке 10 представлены результаты расчетов массового содержания и концентрации сажи в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от изменения угла ПКВ.



Р и с. 10. Результаты расчетов в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения угла ϕ поворота коленчатого вала при $n = 1\,800 \text{ мин}^{-1}$:
а) массового содержания; б) концентрации сажи

F i g. 10. Calculation results in a diesel engine cylinder running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on the change in the angle ϕ of rotation of the crankshaft at $n = 1,800 \text{ мин}^{-1}$:
а) mass content; б) soot concentration

На рисунке 11 представлены расчетные показатели сажесодержания в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от изменения среднего эффективного давления p_e .



Р и с. 11. Расчетные показатели сажесодержания в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1\,800 \text{ мин}^{-1}$:

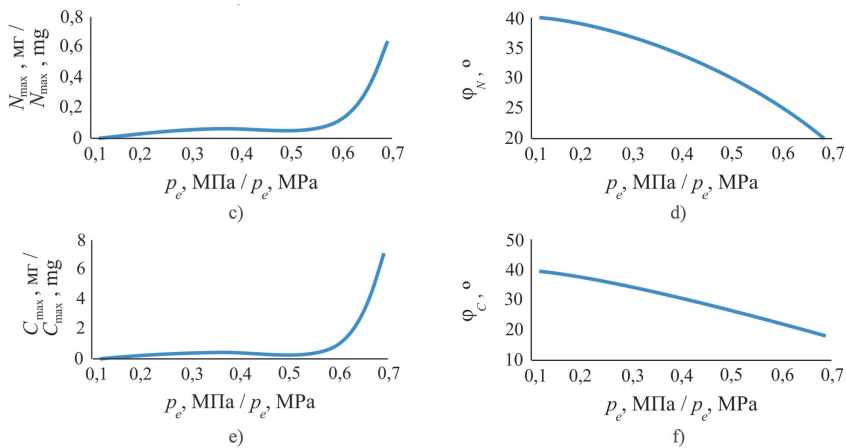
а) максимальное число частиц сажи;
б) угол, соответствующий максимальному числу частиц сажи

F i g. 11. Calculated indicators of soot content in a diesel engine cylinder when running on methanol and rapeseed oil methyl ether, depending on load changes at $n = 1,800 \text{ мин}^{-1}$:

а) the maximum number of soot particles;
б) the angle corresponding to the maximum number of soot particles

Примечание: $M_{\max}$ – максимальное число частиц, шт; ϕ_M – угол ПКВ, соответствующий максимальному числу частиц, град; $N_{\max}$ – максимальное содержание сажи, мг; ϕ_N – угол ПКВ, соответствующий максимальному содержанию сажи, град; $C_{\max}$ – максимальная концентрация сажи, г/м^3 ; ϕ_C – угол ПКВ, соответствующий максимальной концентрации сажи, град.

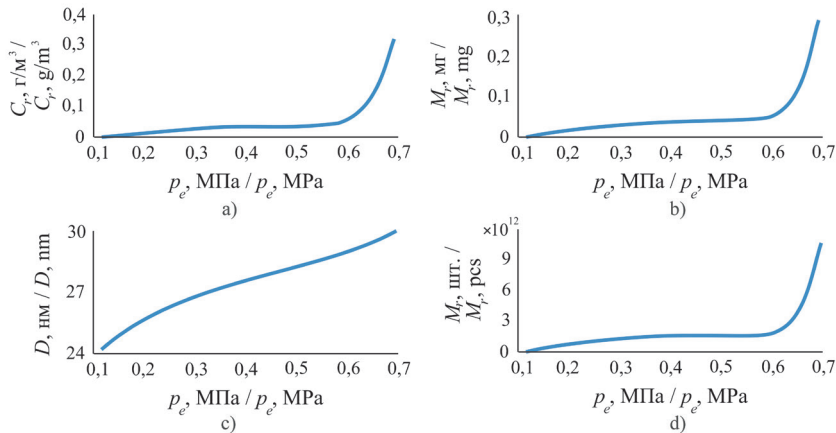
Note: $M_{\max}$ – is the maximum number of particles, pcs; ϕ_M – is the angle of the soot corresponding to the maximum number of particles, deg; $N_{\max}$ – is the maximum soot content, mg; ϕ_N – is the angle of the soot corresponding to the maximum soot content, deg; $C_{\max}$ – is the maximum soot concentration, g/m^3 ; ϕ_C – is the angle of the soot corresponding to the maximum soot concentration, hail.



Р и с. 11. Расчетные показатели сажесодержания в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$:
 с) максимальное содержание сажи; d) угол, соответствующий максимальному содержанию сажи; e) максимальная концентрация сажи; f) угол, соответствующий максимальной концентрации сажи

F i g. 11. Calculated indicators of soot content in a diesel engine cylinder when running on methanol and rapeseed oil methyl ether, depending on load changes at $n = 1,800 \text{ min}^{-1}$:
 c) the maximum soot content; d) the angle corresponding to the maximum soot content; e) the maximum soot concentration; f) the angle corresponding to the maximum soot concentration

На рисунке 12 представлены расчетные показатели сажесодержания в отработавших газах ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от изменения нагрузки.



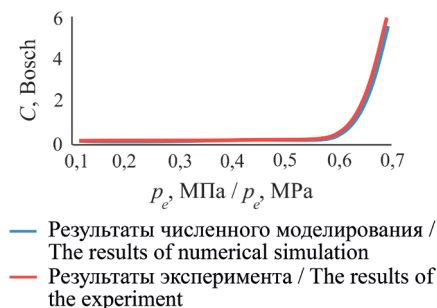
Р и с. 12. Расчетные показатели сажесодержания в отработавших газах дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$:
 а) концентрация сажи; б) масса сажи; в) диаметр частиц сажи; г) количество частиц сажи

F i g. 12. Calculated indicators of soot content in the exhaust gases of a diesel engine when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on the load change at $n = 1,800 \text{ min}^{-1}$:
 а) soot concentration; б) soot mass; в) diameter of soot particles; г) number of soot particles

Примечание: C_r – концентрация сажи, г/м^3 ; M_r – масса сажи, мг ; D – диаметр частиц, нм ; M – количество частиц, шт.

Note: C_r – is the concentration of soot, g/m^3 ; M_r – is the mass of soot, mg ; D – is the particle diameter, nm ; M – is the number of particles, pcs .

Результаты расчетов и экспериментальных измерений дымности ОГ при работе ДД на метаноле и МЭРМ в зависимости от нагрузки представлены на рисунке 13.

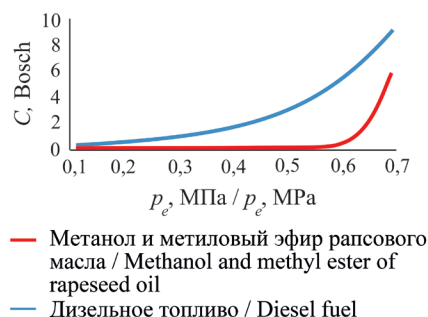


Р и с. 13. Результаты расчетов и экспериментальные данные дымности отработавших газов дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла при $n = 1\,800\text{ мин}^{-1}$

F i g. 13. Calculation results and experimental data of the smoke content of diesel engine exhaust gases when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil at $n = 1,800\text{ мин}^{-1}$

Примечание: C – дымность отработавших газов, Bosch.
Note: C – smoke content of exhaust gases, Bosch.

На рисунке 14 показаны результаты экспериментальных данных дымности отработавших газов ДД в зависимости от изменения нагрузки.



Р и с. 14. Экспериментальные данные дымности отработавших газов дизельного двигателя в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1\,800\text{ мин}^{-1}$

F i g. 14. Experimental data on the smoke content of diesel engine exhaust gases as a function of load changes at $n = 1,800\text{ мин}^{-1}$

Наблюдается надежное снижение дымности отработавших газов ДД при работе на метаноле и МЭРМ в сравнении с дизельным процессом с 5,3 (ДД) до 0,4 ед. Bosch (метанол и МЭРМ), или в 13,25 раза (номинальный режим).

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных выявил следующие существенные закономерности. При работе двигателя на номинальной частоте вращения ($1\,800\text{ мин}^{-1}$) минимальное значение дымности ОГ (0,4 ед. Bosch) было зафиксировано при углах опережения впрыскивания МЭРМ и метанола, равных 34° (рис. 7 а). Наибольшая степень

дымности ОГ (1,3 ед. Bosch) была зафиксирована при углах опережения впрыска метанола, равных 26° . Это явление можно объяснить тем, что более позднее начало подачи топлива приводит к преобладанию диффузионного режима его сгорания, что, в свою очередь, влечет за собой рост дымности ОГ.

На режиме максимального крутящего момента (рис. 7 б) наблюдается схожая динамика дымности ОГ. Наименьшая дымность (0,4 ед. Bosch) достигается при углах опережения зажигания $\Theta_{\text{МЭРМ}} = 34^\circ$ и $\Theta_{\text{М}} = 38^\circ$. При снижении $\Theta_{\text{МЭРМ}}$ до 26° дымность увеличивается до 0,7 ед. Bosch. Максимальная дымность на режиме максимальной мощности (1,25 ед. Bosch) зафиксирована при одновременном значении углов $\Theta_{\text{МЭРМ}} = 26^\circ$ и $\Theta_{\text{М}} = 26^\circ$.

Результаты численного моделирования температурных полей в цилиндре ДД при номинальном режиме выявили, что пиковая температура в области формирования сажи достигает 2 500 К при угле ПКВ $16,5^\circ$ (рис. 8 а). В зоне полного выгорания сажи максимальное значение температуры составило 3 000 К, зафиксированное при угле $16,6^\circ$ ПКВ (рис. 8 б).

Максимальное количество сажевых частиц при номинальном режиме достигает $5,6 \cdot 10^{13}$ шт. при угле ПКВ $9,1^\circ$ (рис. 9 а). Средний диаметр этих частиц на выходе составил 29,8 нм (рис. 9 б). Снижение темпов образования и общего числа сажевых частиц объясняется более длительным процессом сгорания, уменьшенной подачей топлива и более низкой температурой газов. Напротив, при высоких нагрузках увеличение количества сажи обусловлено ростом температуры в зоне пиролиза, что ускоряет конденсацию углерода и распад углеводородов топлива. Анализ номинального режима также показал, что пиковое содержание сажи (0,1255 мг) наблюдается при 30° ПКВ, а максимальная концентрация ($0,9 \text{ г/м}^3$) – при $25,9^\circ$ (рис. 10 а, б).

По результатам расчетов (рис. 11) установлено, что при номинальном режиме максимальное число частиц сажи достигается при угле $9,1^\circ$ ПКВ и составляет $5,6 \cdot 10^{13}$ шт. (рис. 11 а, б), максимальное содержание сажи достигается при угле 30° ПКВ и составляет $N_{\text{max}} = 0,1255 \text{ мг}$ (рис. 11 с, d), максимальная концентрация сажи достигается при угле $25,9^\circ$ ПКВ и составляет $C_{\text{max}} = 0,9 \text{ г/м}^3$ (рис. 11 е, f). Анализ представленных на рисунке 12 расчетов показывает (номинальный режим) величины максимальной концентрации сажи $C_{\text{ог}} = 0,051 \text{ г/м}^3$ (рис. 12 а), массы сажи – 0,0474 мг (рис. 12 б), среднемассового диаметра частиц сажи на выпуске – $D = 29,8 \text{ нм}$ (рис. 12 с), количества частиц сажи – $1,81 \cdot 10^{12}$ шт. (рис. 12 d).

Результаты экспериментальных данных наглядно подтверждают значения расчетных показателей сажесодержания на всех исследуемых нагрузочных режимах. С увеличением нагрузки вследствие повышения часового расхода и цикловой подачи топлива увеличивается дымность отработавших газов ДД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение оксигенированных топлив, таких как метанол и МЭРМ, в дизельное топливо, несмотря на их низкую вязкость и плотность, приводит к повышению содержания кислорода в смеси. Это, в свою очередь, значительно снижает образование сажи в отработавших газах дизельного двигателя по сравнению с использованием обычного ДТ.

Исследования работы ДД на метаноле и МЭРМ позволило установить зависимость максимальных расчетных концентраций сажи в цилиндре от угла ПКВ. Кроме того, были определены уровни содержания сажи в ОГ, а также ее текущие концентрации и массовые доли в цилиндре при варьировании режимов нагрузки и скорости.

При номинальном режиме работы, максимальное скопление сажи в цилиндре с использованием метанола и МЭРМ фиксируется на отметке $0,9 \text{ г/м}^3$ при $25,9^\circ$ ПКВ. В то же время для ДТ этот показатель значительно выше – $8,75 \text{ г/м}^3$ при $14,5^\circ$ ПКВ. Это означает, что при использовании ДТ сажеобразование происходит в 9,75 раза интенсивнее и начинается существенно раньше по сравнению с метанолом и МЭРМ. При использовании метанола и МЭРМ концентрация сажи в ОГ составила $0,0474 \text{ мг}$, что в 5,8 раза меньше по сравнению с показателем в $0,271 \text{ мг}$, зафиксированным при работе на ДТ.

Полученные в ходе расчетов значения концентрации сажи в цилиндре демонстрируют соответствие актуальным теоретическим моделям, описывающим внутрицилиндровые процессы и подтверждаются экспериментальными данными, полученными при измерении дымности ОГ.

Результаты экспериментальных испытаний свидетельствуют о том, что применение метанола и МЭРМ приводит к уменьшению уровня дымности ОГ:

На номинальном режиме ($n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,587 \text{ МПа}$) дымность ОГ на ДТ составила 5,3 ед. Bosch, а на метаноле/МЭРМ – 0,4 ед. Bosch, что соответствует снижению на 92,45 % (в 13,25 раза).

При минимальных оборотах ($n = 1200 \text{ мин}^{-1}$) показатель изменился с 3,8 ед. Bosch (ДТ) до 0,2 ед. Bosch (метанол/МЭРМ), снизившись на 94,7 % (в 19 раз).

При максимальных оборотах ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$) дымность составила 5,0 ед. Bosch (ДТ) против 0,6 ед. Bosch (метанол/МЭРМ), демонстрируя снижение на 88,0 % (в 8,33 раза).

Практической значимостью исследования является расчетное и экспериментальное обоснование снижения дымности и сажеобразования в ДД при работе его на метаноле и МЭРМ, что позволяет полностью заместить штатное нефтяное ДТ альтернативным (метанолом и МЭРМ) и значительно снизить уровень дымности ОГ.

Перспектива исследования заключается в разработке и поиске новых научно обоснованных технических и технологических решений с использованием методов углубленного изучения физико-химических закономерностей формирования сажи в ДД, функционирующих на нетрадиционных альтернативных топливах. Необходимо совершенствование механизмов оценки эмиссии сажи внутри цилиндра и в отработавших газах с учетом многозонных подходов при моделировании процессов, протекающих в цилиндре. Улучшение математических моделей, охватывающих не только фундаментальные аспекты горения, но и испарение топливной смеси с учетом эволюции факела топлива, скорости распространения фронта пламени и пространственно-временных параметров температурных полей, определяющих образование и последующее окисление сажи, а также локальных концентраций компонентов газовой фазы в цилиндре дизельного двигателя, работающего на альтернативном топливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An Ya., Zhang Yu., Chen T., Shi M., Wang Yu., Su Zh. и др. Numerical Study of Ducted Fuel Injection Strategy for Soot Emissions Reduction in a Heavy-Duty Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2025;260:125066. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125066>
2. Wang D., Bao G., He Ch., Li J., Chen Ya., Zhao L. и др. Investigation of the Impact of Combustion Chamber Geometry on Engine Combustion and Emission Performance Under Various Fuel Injection Timings with Biodiesel Blending. *Energy Science & Engineering*. 2025;13(1):268–289. <https://doi.org/10.1002/ese3.2000>
3. Pham D.T., Mai D.N., Ho D.T. Restrict Toxic Emissions from Internal Combustion Engines to Protect the Environment by using Diesel Fuel Mixed with Vegetable Oil. *Journal of Environmental and Earth Sciences*. 2025;7(2):62–75. <https://doi.org/10.30564/jees.v7i2.7693>
4. Ahmed B.M., Luo M., Elbadawi H.A.M., Mahmoud N.M., Sui P.-Ch. Experimental Study of 2-Ethylhexyl Nitrate Effects on Engine Performance and Exhaust Emissions of Diesel Engine Fueled with Diesel-2-Methylfuran Blends. *Energies*. 2025;18(1):98. <https://doi.org/10.3390/en18010098>
5. Agarwal S., Yadav A., Mudgal A., Khan S. Comparative Evaluation of Diesel Engine Performance and Emission Characteristics using Carbon Nanotubes & Graphene Oxide in Ternary Fuel (Jojoba Biodiesel-Diesel-Methanol) Blends. *Next Research*. 2025;2(1):100141. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100141>
6. Rahim Ab.A., Saad I., Mohd Zulkifli N.W., Mohd Yusoff M.N.A. Performance and Emissions of Dual Alcohol Fuel Blend with B20 POME Biodiesel in Diesel Engine. *Sciences and Engineering*. 2025;87(3):455–463. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87.21791>
7. Yadav G.P.K., Muvvala P., Reddy R.M. Optimization of Injection Parameters, and Ethanol Shares for Cottonseed Biodiesel Fuel in Diesel Engine Utilizing Artificial Neural Network (ANN) and Taguchi Grey Relation Analysis (GRA). *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2025;50(3). <https://doi.org/10.1515/jnet-2024-0095>
8. Hamzah A.H., Akroot A., Wahhab H.A.A. Effect of Nanoparticles and Biodiesel Blended with Diesel on Combustion Parameters in Compression Ignition Engine: Numerical Analysis. *Energy Engineering*. 2025;122(5):2059–2075. <https://doi.org/10.32604/ee.2025.061592>
9. No S.Y. Utilization of Pentanol as Biofuels in Compression Ignition Engines. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020;(6). <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00015>
10. Gupta P., Dixit J., Bhoi R., Sharma D., Sharma N. Investigating the Effect of Using Butyl Palmitate as a Fuel Additive on Diesel Engine Performance, Combustion, Emission, and Soot Morphological Characteristics. *Journal of Energy Engineering*. 2025;151(3). <https://doi.org/10.1061/jleed9.eyJeng-5817>
11. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Биотопливо или дымящие автомобили? *Теоретическая и прикладная экология*. 2021;(3):228–236. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-228-236>
12. Cabarcos A., Paz C., Pérez-Orozco R., Vence J. An Image-Processing Algorithm for Morphological Characterisation of Soot Agglomerates from TEM Micrographs: Development and Functional Description. *Powder Technology*. 2022;401:117275. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117275>
13. Lee K.O., Zhu J. Effects of Exhaust System Components on Particulate Morphology in a Light-duty Diesel Engine. In: SAE Transactions. Detroit: SAE International; 2005. pp. 52–60. <https://doi.org/10.4271/2005-01-0184>
14. Adamska K., Smykała S., Zielińska S., Szymański D., Hojeńska A., Stelmachowski P. и др. Oxidation of Soot Over Supported RuRe Nanoparticles Prepared by the Microwave-Polyol Method. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2021;(134):221–242. <https://doi.org/10.1007/s11144-021-02048-y>
15. Eigentler F., Gerlinger P. A Detailed PAH and Soot Model for Complex Fuels in CFD Applications. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2022;(109):225–251. <https://doi.org/10.1007/s10494-022-00319-9>
16. Tsapenkov K.D., Kuraeva Yu.G., Sidorova E.I., Shtyrlov A.E., Zubrilin I.A. Effect of Fuel Composition on Sooting in Engines and Power Plants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2024;(60):478–488. <https://doi.org/10.1134/S0010508224040099>

17. Dhairiyasamy R., Dixit S., Varshney D., Gabriel D. Renewable Syngas and Biodiesel Dual Fuel Applications for Enhanced Engine Performance and Emission Control. *Industrial Crops and Products*. 2025;225:120509. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120509>
18. D S., Murugesan S., T P., A N. Experimental Investigation of Nano-Additive Enhanced Azolla Biodiesel Blends for Improved Diesel Engine Performance and Emission Mitigation. *Engineering Research Express*. 2025;7:015542. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb00b>
19. Martínez M., Martí-Aldaraví P., Salvador F.Ja., Martínez-Miracle E.C. In- and Near-Nozzle and External Flow Characterization in Gasoline Direct Injection (GDI) Engines – a Review of Latest Technologies and Trends. Part 2: Computational Background. *International Journal of Engine Research*. 2025;26(8). <https://doi.org/10.1177/14680874241309959>
20. Paredes-Rojas Ju.C., Costa-Castelló R., Vázquez-Medina R., Flores-Campos Ju.A., Torres-San Miguel Ch.R. Experimental Study on Using Biodiesel in Hybrid Electric Vehicles. *Energies*. 2025;18(7):1621. <https://doi.org/10.3390/en18071621>
21. Ayyappan K., Srinivasan D.R. Effect of Fuel Injection Pressure Variations on Engine Performance-Emission-Particulate Matter with Diesel-Iso-Butanol-Nanoparticle Fuels in Compression Ignition Engine. *Indian Journal of Science and Technology*. 2025;18(5):313–327. <https://doi.org/10.17485/jjst/v18i5.1733>
22. Duan H., Hu W., Wang J., Yin X., Hu E., Zeng Ke. Effects of Diesel Pilot-Injection Strategy on a Methanol/Diesel Dual-Direct Injection Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2025;261:125106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125106>
23. Tutak W., Lukács K., Szwaja S., Bereczky Á. Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine. *Fuel*. 2015;154(15):196–206. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.071>
24. Strizhak P.A., Antonov D.V., Aldoshin S.M., Yanovskii L.S. The Chemmotology of New Generation Synthetic Liquid Fuels. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2025;60(6):1409–1418. <https://doi.org/10.1007/s10553-025-01805-2>
25. Chłopek Z., Sar H., Szczepański K., Zakrzewska D. Operational Issues of Using Replacement Fuels to Power Internal Combustion Engines. *Energies*. 2023;16(6):2643. <https://doi.org/10.3390/en16062643>
26. Марков В.А., Зенин А.А., Девянин С.Н. Работа транспортного дизеля на смеси дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла. *Турбины и дизели*. 2009;(3):14–19. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/382> (дата обращения: 07.08.2025).
27. Papalambrou G., Karystinos V. Parametric Investigation of Methanol Ratio and Diesel Injection Timing for a Marine Diesel-Methanol Dual-Fuel Engine. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(4):648. <https://doi.org/10.3390/jmse13040648>
28. Лиханов В.А., Юрлов А.С. Исследование работы дизеля на метаноле и метиловом эфире рапсового масла на установочных углах опережения впрыскивания топлива. *Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018;2(5):94–99. URL: <http://academy21.ru/nauka-i-innovacii/vestnik-chuvashskoj-gsha-nauchnyj-zhurnal/> (дата обращения: 15.07.2025).
29. Hassan Q.H., Al-Abboodi H. How Methanol-Diesel Fuel Blends Influence the Performance Characteristics of a Compression Ignition Engine. *International Journal of Heat and Technology*. 2025;43(1):319–325. <https://doi.org/10.18280/ijht.430132>
30. Žaglinskis Ju., Rimkus A. Research on the Performance Parameters of a Compression-Ignition Engine Fueled by Blends of Diesel Fuel, Rapeseed Methyl Ester and Hydrotreated Vegetable Oil. *Sustainability*. 2023;15(20):14690. <https://doi.org/10.3390/su152014690>
31. Sánchez-Rodríguez G., Domenzain-González J., Verónico-Sánchez F.Ja., Pérez-López H.I., Zúñiga-Moreno A., Elizalde-Solis O. Density and Viscosity in Biodiesel + Diesel Mixtures from Recycled Feedstocks. *Applied Sciences*. 2025;15(7):3812. <https://doi.org/10.3390/app15073812>
32. Öner İ.V., Atabani A.E., Arslan E., Nadaroğlu H., Ünalın S., Kahraman N. и др. Comprehensive Investigation of the Effects on Fuel, Performance and Emission Properties of Modify Fuel Blends Addition of Graphene Nanoplatelets to Ternary Fuel Blends (Diesel, Waste cooking Biodiesel, and Butanol) in a Diesel Engine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025;(194):360–381. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.080>

REFERENCES

1. An Ya., Zhang Yu., Chen T., Shi M., Wang Yu., Su Zh., et al. Numerical Study of Ducted Fuel Injection Strategy for Soot Emissions Reduction in a Heavy-Duty Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2025;260:125066. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125066>
2. Wang D., Bao G., He Ch., Li J., Chen Ya., Zhao L., et al. Investigation of the Impact of Combustion Chamber Geometry on Engine Combustion and Emission Performance Under Various Fuel Injection Timings with Biodiesel Blending. *Energy Science & Engineering*. 2025;13(1):268–289. <https://doi.org/10.1002/ese3.2000>
3. Pham D.T., Mai D.N., Ho D.T. Restrict Toxic Emissions from Internal Combustion Engines to Protect the Environment by using Diesel Fuel Mixed with Vegetable Oil. *Journal of Environmental and Earth Sciences*. 2025;7(2):62–75. <https://doi.org/10.30564/jees.v7i2.7693>
4. Ahmed B.M., Luo M., Elbadawi H.A.M., Mahmoud N.M., Sui P.-Ch. Experimental Study of 2-Ethylhexyl Nitrate Effects on Engine Performance and Exhaust Emissions of Diesel Engine Fueled with Diesel-2-Methylfuran Blends. *Energies*. 2025;18(1):98. <https://doi.org/10.3390/en18010098>
5. Agarwal S., Yadav A., Mudgal A., Khan S. Comparative Evaluation of Diesel Engine Performance and Emission Characteristics using Carbon Nanotubes & Graphene Oxide in Ternary Fuel (Jojoba Biodiesel-Diesel-Methanol) Blends. *Next Research*. 2025;2(1):100141. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100141>
6. Rahim Ab.A., Saad I., Mohd Zulkifli N.W., Mohd Yusoff M.N.A. Performance and Emissions of Dual Alcohol Fuel Blend with B20 POME Biodiesel in Diesel Engine. *Sciences and Engineering*. 2025;87(3):455–463. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87.21791>
7. Yadav G.P.K., Muvvala P., Reddy R.M. Optimization of Injection Parameters, and Ethanol Shares for Cottonseed Biodiesel Fuel in Diesel Engine Utilizing Artificial Neural Network (ANN) and Taguchi Grey Relation Analysis (GRA). *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2025;50(3). <https://doi.org/10.1515/jnet-2024-0095>
8. Hamzah A.H., Akroot A., Wahhab H.A.A. Effect of Nanoparticles and Biodiesel Blended with Diesel on Combustion Parameters in Compression Ignition Engine: Numerical Analysis. *Energy Engineering*. 2025;122(5):2059–2075. <https://doi.org/10.32604/ee.2025.061592>
9. No S.Y. Utilization of Pentanol as Biofuels in Compression Ignition Engines. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020;(6). <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00015>
10. Gupta P., Dixit J., Bhoi R., Sharma D., Sharma N. Investigating the Effect of Using Butyl Palmate as a Fuel Additive on Diesel Engine Performance, Combustion, Emission, and Soot Morphological Characteristics. *Journal of Energy Engineering*. 2025;151(3). <https://doi.org/10.1061/jleed9.eyJeng-5817>
11. Likhonov V.A., Lopatin O.P. Biofuels or smoking cars? *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2021;(3):228–236. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-228-236>
12. Cabarcos A., Paz C., Pérez-Orozco R., Vence J. An Image-Processing Algorithm for Morphological Characterisation of Soot Agglomerates from TEM Micrographs: Development and Functional Description. *Powder Technology*. 2022;401:117275. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117275>
13. Lee K.O., Zhu J. Effects of Exhaust System Components on Particulate Morphology in a Light-duty Diesel Engine. In: SAE Transactions. Detroit: SAE International; 2005. pp. 52–60. <https://doi.org/10.4271/2005-01-0184>
14. Adamska K., Smykała S., Zieliński S., Szymański D., Hojeńska A., Stelmachowski P., et al. Oxidation of Soot Over Supported RuRe Nanoparticles Prepared by the Microwave-Polyol Method. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2021;(134):221–242. <https://doi.org/10.1007/s11144-021-02048-y>
15. Eigentler F., Gerlinger P. A Detailed PAH and Soot Model for Complex Fuels in CFD Applications. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2022;(109):225–251. <https://doi.org/10.1007/s10494-022-00319-9>
16. Tsapenkov K.D., Kuraeva Yu.G., Sidorova E.I., Shtyrlov A.E., Zubrilin I.A. Effect of Fuel Composition on Sooting in Engines and Power Plants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2024;(60):478–488. <https://doi.org/10.1134/S0010508224040099>

17. Dhairiyasamy R., Dixit S., Varshney D., Gabiriel D. Renewable Syngas and Biodiesel Dual Fuel Applications for Enhanced Engine Performance and Emission Control. *Industrial Crops and Products*. 2025;225:120509. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120509>
18. D S., Murugesan S., T P., A N. Experimental Investigation of Nano-Additive Enhanced Azolla Biodiesel Blends for Improved Diesel Engine Performance and Emission Mitigation. *Engineering Research Express*. 2025;7:015542. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb00b>
19. Martínez M., Martí-Aldaraví P., Salvador F.Ja., Martínez-Miracle E.C. In- and Near-Nozzle and External Flow Characterization in Gasoline Direct Injection (GDI) Engines – a Review of Latest Technologies and Trends. Part 2: Computational Background. *International Journal of Engine Research*. 2025;26(8). <https://doi.org/10.1177/14680874241309959>
20. Paredes-Rojas Ju.C., Costa-Castelló R., Vázquez-Medina R., Flores-Campos Ju.A., Torres-San Miguel Ch.R. Experimental Study on Using Biodiesel in Hybrid Electric Vehicles. *Energies*. 2025;18(7):1621. <https://doi.org/10.3390/en18071621>
21. Ayyappan K., Srinivasan D.R. Effect of Fuel Injection Pressure Variations on Engine Performance-Emission-Particulate Matter with Diesel-Iso-Butanol-Nanoparticle Fuels in Compression Ignition Engine. *Indian Journal of Science and Technology*. 2025;18(5):313–327. <https://doi.org/10.17485/ijst/v18i5.1733>
22. Duan H., Hu W., Wang J., Yin X., Hu E., Zeng Ke. Effects of Diesel Pilot-Injection Strategy on a Methanol/Diesel Dual-Direct Injection Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2025;261:125106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125106>
23. Tutak W., Lukács K., Szwaja S., Bereczky Á. Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine. *Fuel*. 2015;154(15):196–206. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.071>
24. Strizhak P.A., Antonov D.V., Aldoshin S.M., Yanovskii L.S. The Chemmotology of New Generation Synthetic Liquid Fuels. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2025;60(6):1409–1418. <https://doi.org/10.1007/s10553-025-01805-2>
25. Chłopek Z., Sar H., Szczepański K., Zakrzewska D. Operational Issues of Using Replacement Fuels to Power Internal Combustion Engines. *Energies*. 2023;16(6):2643. <https://doi.org/10.3390/en16062643>
26. Markov V.A., Zenin A.A., Devyanin S.N. [Operation of a Transport Diesel Engine on Mixtures of Diesel Fuel and Methyl Ester of Rapeseed Oil]. *Turbines & Diesels Magazine*. 2009;(3):14–19. (In Russ.) Available at: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/382> (accessed 07.08.2025).
27. Papalambrou G., Karystinos V. Parametric Investigation of Methanol Ratio and Diesel Injection Timing for a Marine Diesel-Methanol Dual-Fuel Engine. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(4):648. <https://doi.org/10.3390/jmse13040648>
28. Likhanov V.A., Yurlov A.S. [Investigation of the Operation of Diesel Engines Running on Methanol and Methyl Ether of Rapeseed Oil at Fuel Injection Fixer-Advanced Angles]. *Vestnik Chuvashskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2018;2(5):94–99. (In Russ.) Available at: <http://academy21.ru/nauka-i-innovacii/vestnik-chuvashskoj-gsha-nauchnyj-zhurnal/> (accessed 15.07.2025).
29. Hassan Q.H., Al-Abboodi H. How Methanol-Diesel Fuel Blends Influence the Performance Characteristics of a Compression Ignition Engine. *International Journal of Heat and Technology*. 2025;43(1):319–325. <https://doi.org/10.18280/ijht.430132>
30. Žaglinskis Ju., Rimkus A. Research on the Performance Parameters of a Compression-Ignition Engine Fueled by Blends of Diesel Fuel, Rapeseed Methyl Ester and Hydrotreated Vegetable Oil. *Sustainability*. 2023;15(20):14690. <https://doi.org/10.3390/su152014690>
31. Sánchez-Rodríguez G., Domenzain-González J., Verónico-Sánchez F.Ja., Pérez-López H.I., Zúñiga-Moreno A., Elizalde-Solis O. Density and Viscosity in Biodiesel + Diesel Mixtures from Recycled Feedstocks. *Applied Sciences*. 2025;15(7):3812. <https://doi.org/10.3390/app15073812>
32. Öner İ.V., Atabani A.E., Arslan E., Nadaroğlu H., Ünalın S., Kahraman N., et al. Comprehensive Investigation of the Effects on Fuel, Performance and Emission Properties of Modify Fuel Blends Addition of Graphene Nanoplatelets to Ternary Fuel Blends (Diesel, Waste cooking Biodiesel, and Butanol) in a Diesel Engine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025;(194):360–381. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.080>

Об авторах:

Лиханов Виталий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-7176>, Researcher ID: AGN-7347-2022, Scopus ID: 57197821797, SPIN-код: 9474-7629, lihanov.va@mail.ru

Лопатин Олег Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: AAD-8374-2019, Scopus ID: 57197821205, SPIN-код: 8716-0189, nirs_vsaa@mail.ru

Вклад авторов:

В. А. Лиханов – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

О. П. Лопатин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных / доказательств; разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 12.11.2025; поступила после рецензирования 18.12.2025;
принята к публикации 23.12.2025*

About the authors:

Vitaly A. Likhanov, Dr.Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Heat Engines, automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrsky Ave., Kirov 610017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-7176>, Researcher ID: AGN-7347-2022, Scopus ID: 57197821797, SPIN-code: 9474-7629, lihanov.va@mail.ru

Oleg P. Lopatin, Dr.Sci. (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of Heat Engines, automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrsky Ave., Kirov 610017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: AAD-8374-2019, Scopus ID: 57197821205, SPIN-code: 8716-0189, nirs_vsaa@mail.ru

Authors contribution:

V. A. Likhanov – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyse or synthesize study data; preparation, creation and / or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

O. P. Lopatin – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection; development or design of methodology; creation of models; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically visualization / data presentation.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 12.11.2025; revised 18.12.2025; accepted 23.12.2025