

# ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 621.436

doi: 10.15507/2658-4123.032.202203.373-389

Научная статья



## Применение рапсового масла и этанола в дизельном двигателе

**В. А. Лиханов** , **О. П. Лопатин***Вятский государственный агротехнологический университет  
(г. Киров, Российская Федерация)* *lihanov.va@mail.ru*

### Аннотация

*Введение.* Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания позволяют не только снизить вредное воздействие отработавших газов на окружающую среду без применения дорогостоящих систем очистки, но и диверсифицировать рынок топлива, сокращая потребление невозобновляемых источников энергии, а научные исследования, направленные на применение альтернативных топлив, позволяют выявить наиболее оптимальные варианты замены невозобновляемому сырью. Цель исследования – изучить, как добавление этанола в штатный тракторный дизель с объемным смесеобразованием и сгоранием от факела запального рапсового масла влияет на работу двигателя, а также оптимизировать отдельные цикловые поддачи для получения максимального энергетического и экологического эффекта.

*Материалы и методы.* Статья посвящена описанию результатов применения рапсового масла и этанола в серийном тракторном дизеле размерности 2Ч 10,5/12,0 с организацией отдельного впрыска топлива непосредственно в камеру сгорания. В ходе экспериментальных исследований проведены индицирование рабочего процесса, измерения расхода топлива и потребления воздуха, отбор проб отработавших газов для исследования состава газа и определения содержания токсичных компонентов и дымности.

*Результаты исследования.* Определена точная цикловая подача этанола и рапсового масла, получены величины среднего эффективного давления, осредненной температуры газов в цилиндре, активного и полного тепловыделения. Показано, что с увеличением цикловой подачи этанола доля тепла от кинетического сгорания возрастает, а для дизельного процесса характерна обратная тенденция – увеличение доли диффузионного сгорания с ростом нагрузки. Проведен анализ внутрицилиндровых процессов при работе на этаноле и рапсовом масле в сопоставлении с традиционным дизельным процессом.

*Обсуждение и заключение.* Применение рапсового масла и этанола способно полностью заместить традиционное топливо нефтяного происхождения для действующего дизельного двигателя путем установки дополнительного топливного оборудования

© Лиханов В. А., Лопатин О. П., 2022

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

и модификации головки блока цилиндров (монтаж дополнительной форсунки). При этом существенно улучшаются экологические показатели работы дизеля.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, этанол, рапсовое масло, сгорание, тепловыделение, токсичность, отработавшие газы

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** 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: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.373-389>

Original article

## Usage of Rapeseed Oil and Ethanol in a Diesel Engine

V. A. Likhanov , O. P. Lopatin

*Uyatka State Agrotechnological University (Kirov, Russian Federation)*

 [lihanov.va@mail.ru](mailto:lihanov.va@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Alternative fuels in IC-engines make it possible to reduce the harmful effects of exhaust gases on the environment without the use of expensive cleaning systems, diversify the fuel market, and reduce the consumption of non-renewable energy resources, while research aimed at studying the use of alternative fuels makes it possible to find optimal options for replacing non-renewable raw materials. The purpose of the work is to study the effect of using ethanol in a standard tractor diesel engine with volumetric mixing and combustion from flare resulting from the autoignition of a rapeseed oil pilot portion and to optimize separate cyclic fuel deliveries to obtain maximum energy and environmental effect.

**Materials and Methods.** The article deals with the description of the results of the use of rapeseed oil and ethanol in a serial tractor diesel engine of dimension 2F 10.5/12.0 with separate fuel injection directly into the combustion chamber. In the course of experimental studies, the working process was indicated by a piezo quartz pressure sensor installed in the cylinder head, fuel and air consumption were measured, and samples of exhaust gases to study the gas composition and determine the content of toxic components and smokiness were taken.

**Results.** The exact ethanol and rapeseed oil delivery was determined; the values of the average effective pressure, the average temperature of gases in the cylinder, and active and full heat generation were obtained. It is shown that with an increase in the cyclic ethanol delivery, the proportion of heat from kinetic combustion increases, while the diesel process is characterized by an increase in the proportion of diffusion combustion when the load increases. The analysis of the processes inside the cylinder when the engine runs on ethanol and rapeseed oil in comparison with the traditional diesel process is carried out.

**Discussion and Conclusion.** The use of rapeseed oil and ethanol can completely replace the traditional fuel of petroleum origin for an operating diesel engine by installing additional fuel equipment and modifying the head of cylinder block through mounting an additional nozzle. In this case, the environmental performance of the diesel engine improves significantly.

**Keywords:** diesel engine, ethanol, rapeseed oil, combustion, heat generation, toxicity, exhaust gases

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

**For citation:** Likhanov V.A., Lopatin O.P. Usage of Rapeseed Oil and Ethanol in a Diesel Engine. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):373–389. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.373-389>

## Введение

Неуклонный рост потребления ископаемых энергоресурсов нефтегазовой отрасли может привести к энергетическому кризису. Данная проблема стимулирует ученых исследовать и внедрять альтернативные возобновляемые источники энергии, использование которых может значительно снизить нагрузку на экологическую систему [1].

Технические средства разнообразны по конструкции и организации рабочего процесса. Впрыск топлива в них может быть осуществлен как по классическому, так и по достаточно сложному, а иногда и индивидуальному закону топливоподачи. Все это приводит к расширению спектра возможностей применения и исследования альтернативного топлива с определенными физико-химическими свойствами. Возможно, один из видов такого топлива значительно улучшит эксплуатационные и экологические характеристики работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Работы, посвященные данной научной проблеме, перспективны, поскольку их результаты помогут обеспечить не только снижение вредного воздействия процесса сгорания топлива в двигателе на окружающую среду, но и позволят диверсифицировать рынок топлива, сокращая потребление традиционных источников энергии. Таким образом, исследование работы дизелей на альтернативных топливах одновременно направлено на решение двух глобальных проблем: истощение сырьевых энергетических ресурсов и загрязнение окружающей среды вредными выбросами силовых установок.

Известно, что в отработавших газах (ОГ) дизелей, работающих на нефтяном топливе, присутствует более 280 токсичных компонентов разной степени опасности, среди которых наиболее вреден несгоревший

сконденсированный углерод, попадающий из камеры сгорания (КС) двигателя в атмосферу в виде частиц сажи. Он имеет активную разветвленную поверхность, на которой конденсируются опасные вещества, образующиеся при сгорании топлива в КС. Среди них наибольшую угрозу представляют молекулы полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [2].

Существует множество методов и способов снижения токсичности и дымности ОГ ДВС. Но если мы дополнительно ставим задачу экономии нефтяных энергоносителей, то выход в данной ситуации один – применение альтернативного топлива. Оно вследствие особенностей своего физико-химического состава и физических свойств при горении в условиях КС менее склонно к образованию сажи [3–6]. Таким альтернативным топливом являются спирты и растительные масла. Но использовать их можно только после проведения исследований и испытаний.

Поэтому исследования, посвященные влиянию альтернативных топлив на экологические и эффективные показатели работы дизелей, являются важной научной задачей. Положительные результаты исследований докажут возможность широкого применения нетрадиционных источников энергии в будущем [7].

Цель исследования – изучить, как добавление этанола в штатный тракторный дизель с объемным смесеобразованием и сгоранием от факела запального рапсового масла влияет на работу двигателя, а также оптимизировать отдельные цикловые подачи для получения максимального энергетического и экологического эффекта.

## Обзор литературы

На сегодняшний день самым распространенным биологическим топливом в мире является биоэтанол, составляющий более 80 % от общего

количества биотоплива, производимого из биологического сырья. Обеспеченность России биоэтанолом не вызывает опасений, поскольку сырьем для его производства служит не только сахаро- и крахмалосодержащий продукт, но и целлюлозосодержащая основа (различные отходы переработки древесины, зерна, соломы и др.). Что касается топливного этанола, то его производят методами укороченной дистилляции. При этом в нем содержатся сивушные масла, метанол, даже бензин, но зато он дешевле и более конкурентоспособный в экономическом плане. Эти критерии могут благоприятно сказаться на применении биоэтанола в ДВС [8].

Но масштабное внедрение этилового спирта как альтернативного топлива для дизеля ограничено вследствие его низкой самовоспламеняемости (цетановое число в 5 раз ниже дизельного топлива (ДТ)). Поэтому наряду с использованием этанола в дизеле необходимы дополнительные мероприятия или методы: применение специальных присадок, изменение геометрии или объема КС, повышение температуры заряда, степени сжатия, применение специальных средств воспламенения и др. [9–12].

Проблемы применения спиртовых топлив в дизелях подробно рассмотрены в многочисленной специальной литературе [13–16]. Ужесточение норм вредных выбросов вынуждает разработчиков дизелей как использовать специальные меры, воздействующие на процесс сгорания, так и комплектовать систему выпуска дополнительными модулями очистки ОГ. Все эти системы снижают термический и эффективный КПД дизеля, усложняют конструкцию двигателя и повышают стоимость его обслуживания [17–20].

Правильная организация процесса подачи топлива обеспечивает повышение КПД работы двигателя [21–23]. Использование отдельных систем топливоподачи увеличивает число регулировочных параметров, делает работу двигателя более адаптивной, расширяет диапазон рабочих нагрузочных и скоростных режимов. Решение задачи оптимизации подачи топлива по опережению, продолжительности и давлению впрыскивания требует значительного объема экспериментальных исследований, поскольку численные методы пока не позволяют добиться удовлетворительных результатов и нуждаются в проверке<sup>1</sup> [24; 25].

В качестве альтернативных энергетических источников легко могут применяться топлива с существенно более низким цетановым числом, воспламенение которых в КС может быть организовано различными способами. Наиболее эффективен метод с непосредственным впрыском в КС топливом отдельными форсунками. Такой метод повышает надежность и скорость воспламенения топлива в цилиндре за счет пересечения факелов распыленного топлива [26; 27]. Регулируя установочный угол опережения впрыскивания топлива (УУОВТ), можно добиться приемлемой жесткости работы двигателя, минимальной токсичности ОГ и высокой эффективности сгорания и тепловыделения [28; 29]. Однако использование такого метода организации рабочего процесса не позволяет полностью исключить использование невозобновляемого топлива. ДТ может быть без существенной модернизации двигателя заменено возобновляемым биотопливом на основе рапсового масла. Полное замещение дизельного топлива с использованием штатной

<sup>1</sup> Лиханов В. А., Козлов А. Н. Моделирование сажевыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на альтернативных топливах. Киров : Вятская ГСХА, 2019. 157 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42742551> (дата обращения: 04.04.2022).

системы топливоподачи ухудшает эффективность процесса сгорания. Отмечается появление нагара на поверхности камеры сгорания, поскольку вязкость рапсового масла существенно выше [30–33]. Рапсовое масло может быть использовано в качестве запального топлива, которое в камере сгорания дизеля служит для воспламенения основного спиртового топлива и впрыскивается незначительными порциями. Это позволяет избежать появления нагара на поршне и распылителе форсунки. Исследование возможности организации подобной системы питания двигателя с воспламенением от сжатия проведены на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов в Вятском ГАТУ [7; 11; 15; 34].

#### Материалы и методы

Экспериментальный образец дизеля воздушного охлаждения 2Ч 10,5/12,0 был переоборудован для работы на

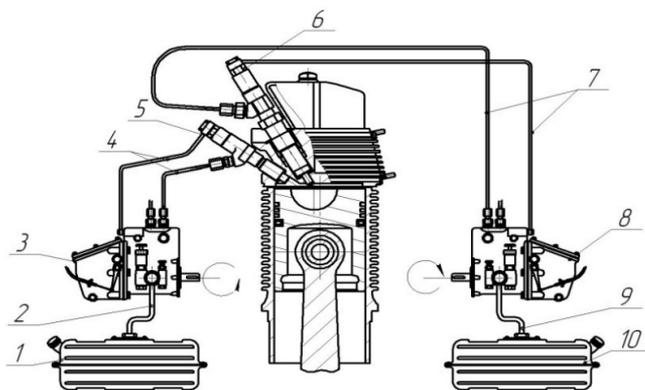
этиловом спирте и рапсовом масле (РМ) с использованием отдельных систем топливоподачи. Дизель оснащен полусферической камерой сгорания в поршне. Этанол использовался в качестве основного топлива и воспламенялся от поступающей в КС дизеля струи РМ. Этиловый спирт имеет меньшую теплотворную способность, по сравнению с дизельным топливом, следовательно, возникла потребность корректировать цикловую подачу топлива в сторону увеличения (табл.).

Впрыск РМ для воспламенения этанола осуществлялся с помощью специальной топливоподающей системы с штифтовой форсункой, которая создает конус распыленного топлива с углом в основании 45–50 градусов. Для этого в штатных головках цилиндра сверлились отверстия для монтажа установочных штифтов и форсунки (рис. 1).

Т а б л и ц а  
Table

**Физические свойства топлив**  
**Physical properties of fuels**

Наименование / Name	ДТ / Diesel	РМ / Rapeseed oil	Этанол / Ethanol
Молекулярная формула / Molecular formula	$C_{14}H_{30}$	$C_{18}H_{34}O_2$	$C_2H_5OH$
Цетановое число / Cetane number	46	39	8
Молекулярный вес, г/моль / Molecular weight, g/mol	198	282	46
Плотность, кг/м <sup>3</sup> / Density, kg/m <sup>3</sup>	820	917	789
Низшая теплотворная способность, МДж/м <sup>3</sup> / Lower calorific value, MJ/m <sup>3</sup>	42,4	37	26,7
Температура самовоспламенения, °С / Autoignition temperature, °С	220	318	420
Стехиометрическое соотношение воздуха и топлива / Stoichiometric air-fuel ratio	14,3	12,6	9
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с / Kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /s	4	42,1	1,5
Содержание углерода, % / Carbon content, %	0,864	0,776	0,52
Содержание водорода, % / Hydrogen content, %	0,121	0,116	0,13
Содержание кислорода, % / Oxygen content, %	0,0095	0,109	0,35



Р и с. 1. Схема раздельной системы подачи топлив:

1, 10 – топливные баки; 2, 9 – топливопроводы низкого давления;  
3, 8 – топливные насосы высокого давления; 4, 7 – топливные магистрали высокого давления;  
5 – форсунка запального топлива (РМ); 6 – штатная форсунка для подачи этанола

Fig. 1. Diagram of a separate fuel supply system: 1, 10 – fuel tanks; 2, 9 – low pressure fuel lines;  
3, 8 – high-pressure fuel pumps; 4, 7 – high-pressure fuel lines; 5 – ignition fuel nozzle (rapeseed oil);  
6 – standard nozzle for ethanol supply

В ходе экспериментальных исследований проводилось индицирование рабочего процесса с помощью пьезокварцевого датчика давления, установленного в головке цилиндра, измерение расхода топлива и потребления воздуха, отбирались пробы ОГ для исследования состава газа, определялось содержание токсичных компонентов и дымности. Полученная от датчика давления многоцикловая индикаторная диаграмма усреднялась путем наложения сигнала за 10-секундный испытательный цикл с периодом в два оборота коленчатого вала двигателя. Для корректного наложения графиков использовался индуктивный датчик верхней мертвой точки (ВМТ). По осредненной индикаторной диаграмме определяли среднее эффективное давление, частоту вращения коленчатого вала, осредненную температуру газов в цилиндре, тепловыделение. По измерениям весов определялась точная цикловая подача этанола и рапсового масла. Анализ внутрицилиндровых

процессов проводился в сопоставлении с традиционным дизельным процессом. При проведении испытаний на дизельном топливе на двигатель были установлены серийные головки цилиндров.

#### Результаты исследования

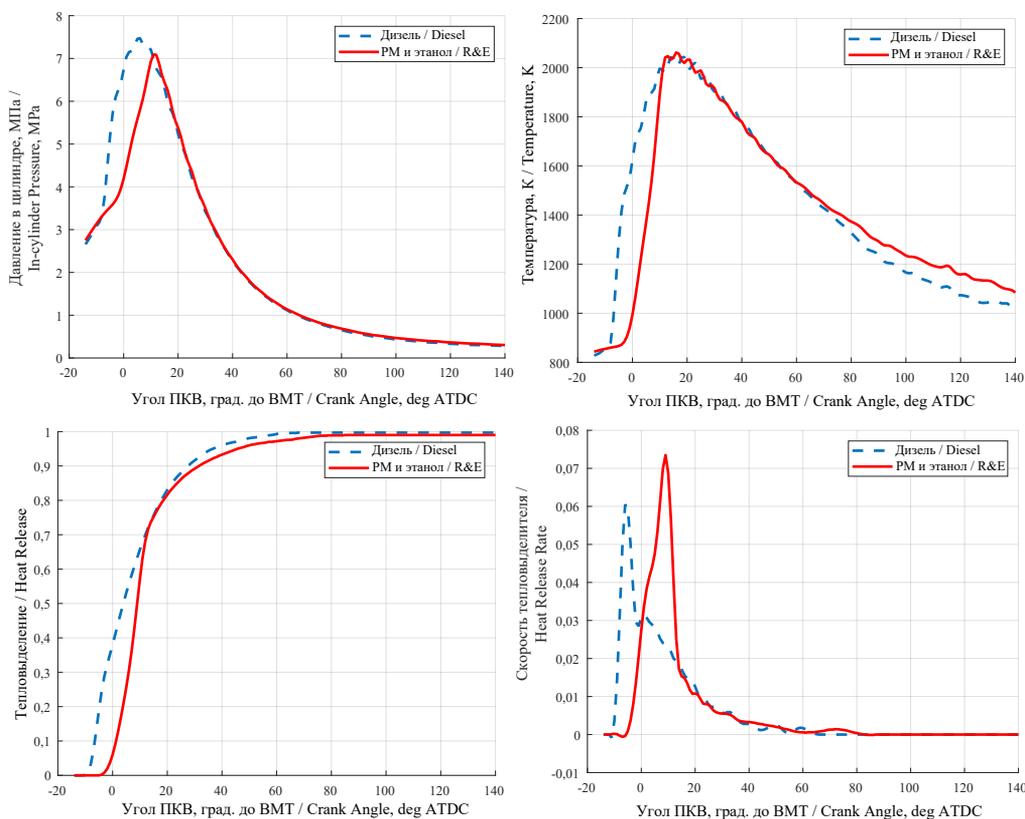
Результаты стендовых испытаний работы дизеля на номинальном режиме при частоте вращения коленчатого вала  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и среднем эффективном давлении  $p_e = 0,588 \text{ МПа}$  приведены на рисунке 2. УУОВТ (дизельного) составлял 30 градусов до ВМТ и 34 градуса до ВМТ для этанола и рапсового масла. Несмотря на ранний впрыск, РМ воспламеняется в КС дизеля существенно позднее. Индукционный период сгорания и период задержки воспламенения (ПЗВ) увеличиваются, поскольку температура самовоспламенения на 100 К для РМ выше, чем для ДТ, следовательно, процесс сгорания смещается на более поздние углы поворота коленчатого вала (ПКВ). Максимальное давление

сгорания составляет при работе двигателя на РМ и этаноле 7,1 МПа, при 11,5 градуса ПКВ после ВМТ. При работе дизеля на ДТ максимальное давление газов в цилиндре составляет 7,43 МПа при 5,7 градуса ПКВ.

Цикловая подача этилового спирта в КС дизеля составляет 52 мг/цикл, а подача запального РМ 13 мг/цикл. Цикловая подача ДТ при соответствующей нагрузке на двигатель составила 41,2 мг/цикл. РМ обладает большей кинематической вязкостью, что повышает дальнобойность топливного факела в цилиндре. По-видимому, часть запального топлива сгорает, испаряясь со стенок камеры сгорания,

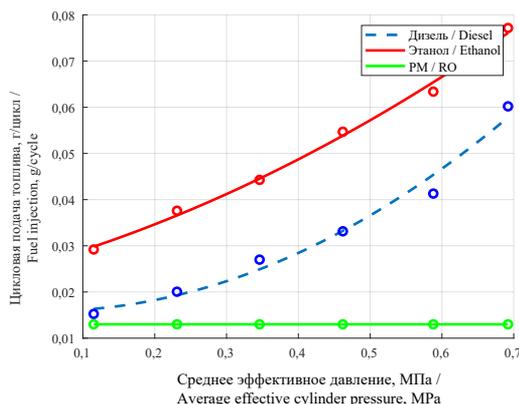
за счет чего повышается скорость тепловыделения после 40 градусов ПКВ. Спиртовое топливо сгорает в кинетическом режиме, продолжительность интенсивного тепловыделения составляет около 20 градусов ПКВ. Быстрое тепловыделение сразу после ВМТ повышает эффективность цикла, не вызывая увеличение жесткости процесса сгорания. Это создает возможность форсирования дизеля путем увеличения цикловой подачи этилового спирта в КС без появления критических давлений в цилиндре.

Изменение нагрузки на тормозном стенде производилось регулировкой цикловой подачи этанола (рис. 3).



Р и с. 2. Характеристики сгорания топлива в цилиндре дизеля

F i g. 2. Characteristics of fuel combustion in a diesel cylinder



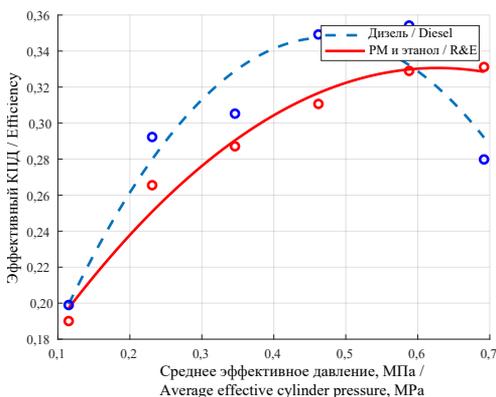
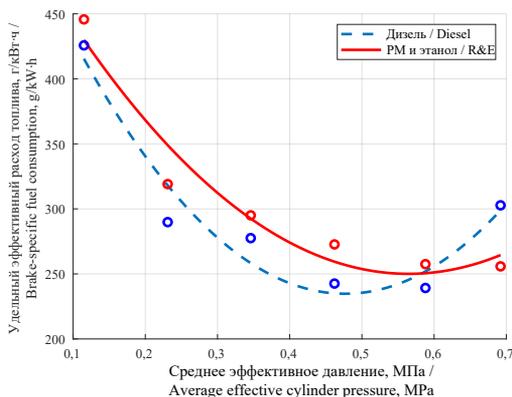
Р и с. 3. Цикловые подачи топлив при различных нагрузках  
F i g. 3. Cyclic fuel delivery at various loads

При таком условии количество запального топлива в цилиндре оставалось всегда постоянным. На режимах частичной нагрузки использование альтернативных топлив приводит к существенному снижению эффективности работы двигателя. Повышается удельный эффективный расход топлива, существенно снижается эффективный КПД, растет задержка воспламенения, увеличивается продолжительность сгорания.

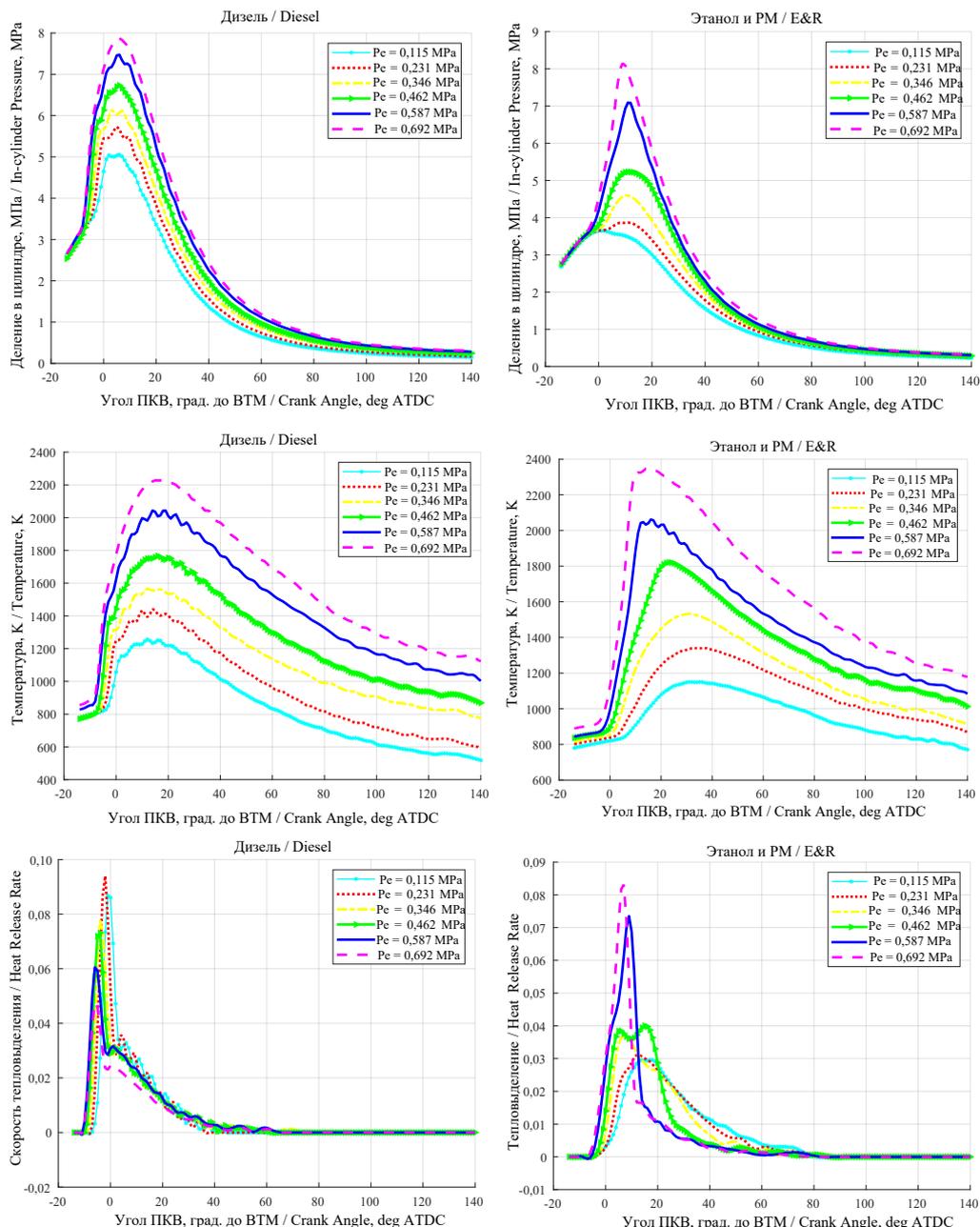
При росте нагрузки выше номинальной точки повышается эффективность

применения альтернативных топлив. Однако максимальный эффективный КПД при работе двигателя на этиловом спирте и РМ все же ниже, чем при работе на ДТ, и составляет 0,33 (рис. 4).

Процесс сгорания при использовании этанола с запальным РМ существенно изменяется (рис. 5). Здесь оказывают влияние значительные расхождения физических свойств топлива, вязкости, цетанового числа, теплоты сгорания и испарения. Об этом уже говорилось выше.



Р и с. 4. Показатели эффективности работы дизеля на различных топливах  
F i g. 4. Diesel performance indicators for various fuels



Р и с. 5. Характеристики внутрицилиндровых процессов, индикаторное давление, осредненная температура рабочего тела и скорость тепловыделения при работе дизеля на альтернативных и традиционном топливах

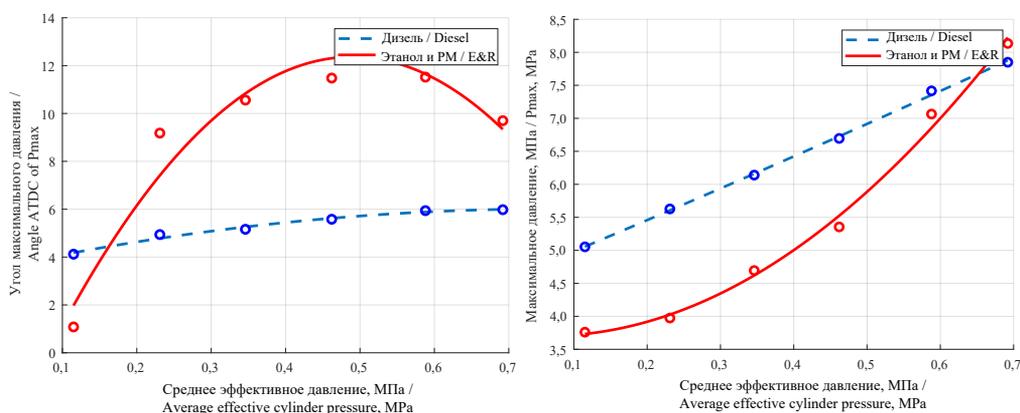
Fig. 5. Characteristics of processes inside the cylinder, indicator pressure, average temperature of the working fluid and the rate of heat release during diesel operation on alternative and traditional fuels

Главным образом изменяется характер тепловыделения, что отражается на функции осредненной температуры рабочего тела и давления газов в цилиндре от угла ПКВ дизеля. При условии обеспечения неизменяемого УУОВТ работа дизеля на ДТ носит более постоянный характер на всем диапазоне нагрузок с ярко выраженным двухстадийным характером протекания и четкой границей диффузионного и кинетического сгорания. Одновременный впрыск двух различных по физическим свойствам топлив в разном соотношении модифицирует кривую тепловыделения и размывает границу раздела между кинетической и диффузионной областью горения. Если с увеличением цикловой подачи этанола доля тепла от кинетического сгорания возрастает, то для дизельного процесса характерна обратная тенденция – увеличение доли диффузионного сгорания с ростом нагрузки. При этом на режиме максимальной нагрузки полное тепловыделение соответствует лишь 78 % потребленного топлива. Этанол и рапсовое мало на этих нагрузках полностью сгорают в цилиндре.

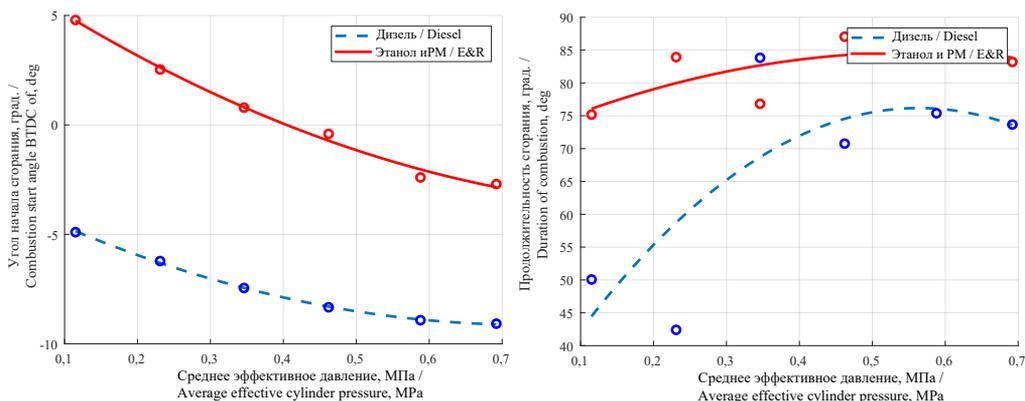
Несмотря на рост УУОВТ на 4 градуса ПКВ, максимальное давление газов в цилиндре достигается на всем диапазоне нагрузок позже, чем на штатном двигателе (рис. 6). При этом максимальное давление газов в цилиндре ниже при всех нагрузках, кроме максимальной. На рисунке 7 показаны границы начала горения и общая продолжительность сгорания.

Если начало горения можно было четко определить по отрыву индикаторной диаграммы от кривой сжатия, то определение продолжительности горения имеет существенную погрешность. Тем не менее можно достоверно определить, что, несмотря на позднее начало сгорания, продолжительность сгорания при работе двигателя на этаноле и РМ увеличивается от 8 до 30 %.

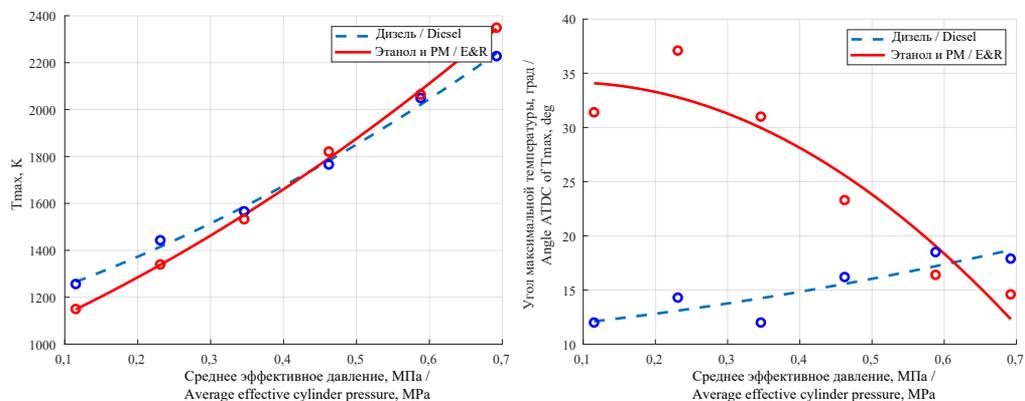
Угол достижения максимальной температуры газов в цилиндре при работе двигателя на этиловом спирте и РМ имеет максимальные значения при малых нагрузках и постепенно снижается с ростом температуры газов в цилиндре (рис. 8). На максимальные осредненные значения температуры газов в цилиндре вид применяемого



Р и с. 6. Максимальное давление газов в цилиндре и угол достижения пиковой точки  
 F i g. 6. Maximum gas pressure in the cylinder and the angle of reaching the peak point



Р и с. 7. Продолжительность и начало сгорания топлив в цилиндре двигателя  
F i g. 7. Duration and start of fuel combustion in the engine cylinder



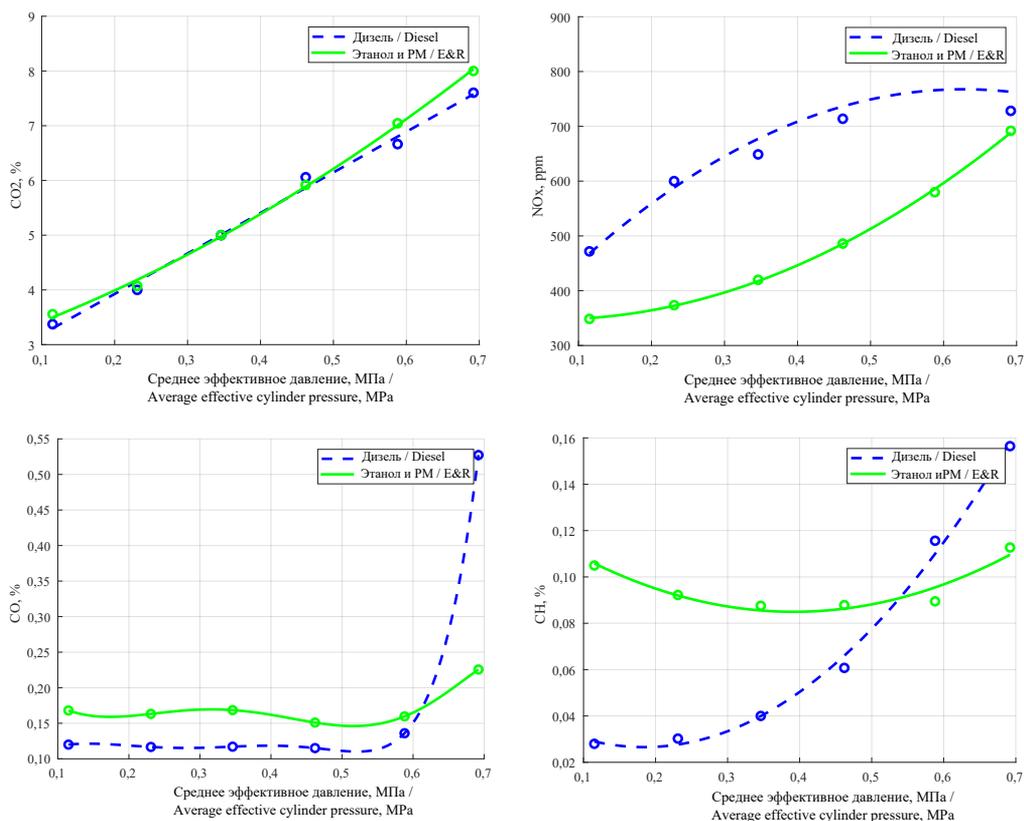
Р и с. 8. Значения максимальной осредненной температуры газов в цилиндре и угол максимальной температуры газов в цилиндре  
F i g. 8. Values of the maximum averaged temperature of gases in the cylinder and the angle of the maximum temperature of gases in the cylinder

топлива не оказывает влияния, а качество процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре отражается на экологических показателях работы дизеля (рис. 9).

### Обсуждение и заключение

Учитывая рост потребления исчерпаемых энергоресурсов нефтегазовой отрасли и увеличение нагрузки на экосистему, а также опираясь на анализ литературных источников, можно сделать вывод, что среди существующего многообразия методов и способов снижения токсичности и дымности ОГ ДВС *Technologies, machinery and equipment*

с одновременной экономией нефтяного моторного топлива наиболее актуально применение в ДВС альтернативного топлива. В качестве альтернативного источника энергии обосновано применение этилового спирта и рапсового масла методом непосредственного впрыскивания в КС отдельными форсунками, что повышает надежность и скорость воспламенения топлива в цилиндре за счет пересечения факелов распыленного топлива. Рапсовое масло использовалось в качестве запального топлива, служащего в КС



Р и с. 9. Влияние применения этанола и РМ на экологические показатели работы дизеля в зависимости от изменения нагрузки

Fig. 9. The effect of the use of ethanol and rapeseed oil on the environmental performance of diesel depending on load changes

для воспламенения этилового спирта. Оптимизировав величину УОВТ, мы получили приемлемую жесткость и высокую эффективность процессов сгорания и тепловыделения при минимальной токсичности ОГ.

Таким образом, на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов в Вятском ГАТУ изучено влияние применения этанола в штатном тракторном дизеле с объемным смесеобразованием с организацией сгорания от факела запального рапсового масла. Также оптимизированы раздельные цикловые подачи для получения максимального энергетического и экологического эффекта.

В результате проведенного исследования авторы пришли к следующим выводам:

1. Применение этанола и запального РМ способно полностью заместить традиционное топливо нефтяного происхождения для действующего дизельного двигателя путем установки дополнительного топливного оборудования и модификации головки блока цилиндров для монтажа дополнительной форсунки.

2. Применение этанола и запального РМ позволяет повысить КПД работы двигателя на максимальных нагрузках и форсировать его за счет особенностей

процесса сгорания, а также повысить номинальную мощность.

3. Использование этанола и РМ позволяет существенно улучшить экологические показатели работы дизеля как на номинальном, так и на форсированных режимах и в разы снизить

дымность ОГ. При этом на треть снижаются выбросы оксидов азота и продукты неполного сгорания.

Для обеспечения эффективной и нетоксичной работы двигателя на этаноле и РМ на режимах малых нагрузок требуются дополнительные исследования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lung Function and Self-Rated Symptoms in Healthy Volunteers after Exposure to Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Exhaust with and without Particles [Электронный ресурс] / L. Green [et al.] // Particle and Fibre Toxicology. 2022. Vol. 19, Issue 9. doi: <https://doi.org/10.1186/s12989-021-00446-7>

2. Physicochemical and Cell Toxicity Properties of Particulate Matter (PM) from a Diesel Vehicle Failed with Diesel, Spent Coffee Ground Biodiesel, and Ethanol [Электронный ресурс] / P. K. Wong [et al.] // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 824. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153873>

3. Agarwal A. K., Kumar V., Ankur Kalwar A. J. Fuel Injection Strategy Optimisation and Experimental Performance and Emissions Evaluation of Diesel Displacement by Port Fuel Injected Methanol in a Retrofitted Mid-Size Genset Engine Prototype [Электронный ресурс] // Energy. 2022. Vol. 248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123593>

4. Comparative Assessment of Performance, Emissions and Combustion Characteristics of Tire Pyrolysis Oil-Diesel and Biodiesel-Diesel Blends in a Common-Rail Direct Injection Engine [Электронный ресурс] / Y. H. Teoh [et al.] // Fuel. 2022. Vol. 313. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123058>

5. Performance and Emissions of Neat Crude Palm Oil and Its Emulsions as Diesel Engine Fuel [Электронный ресурс] / A. F. E. Chan [et al.] // Environmental Progress and Sustainable Energy. 2022. Vol. 41, Issue 2. doi: <https://doi.org/10.1002/ep.13749>

6. Impact of Compression Ratio on Combustion Behavior of Hydrogen Enriched Biogas-Diesel Operated CI Engine [Электронный ресурс] / P. Rosha [et al.] // Fuel. 2022. Vol. 310, Part B. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122321>

7. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Биотопливо или дымящие автомобили? // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 228–236. doi: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-228-236>

8. Оребаева А. А. Производство биоэтанола из возобновляемого сырья // Устойчивое развитие науки и образования. 2021. № 12. С. 18–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47936391> (дата обращения: 04.04.2022).

9. Experimental Investigation of High Alcohol Low Viscous Renewable Fuel in DI Diesel Engine / S. Wang [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28, Issue 10. P. 12026–12040. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08298-y>

10. Investigation of the Performances of a Diesel Engine Operating on Blended and Emulsified Bio-fuels from Rapeseed Oil [Электронный ресурс] / V. A. Markov [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14, Issue 20. doi: <https://doi.org/10.3390/en14206661>

11. Lopatin O. P. Investigation of Alternative Fuel Oxidation Kinetics in an Internal Combustion Engine [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062005>

12. Methanol as a Fuel for Internal Combustion Engines / S. Verhelst [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. 2019. Vol. 70. P. 43–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.10.001>

13. Pedrozo V. B., May I., Zhao H. Exploring the Mid-Load Potential of Ethanol-Diesel Dual-Fuel Combustion with and without EGR // Applied Energy. 2017. Vol. 193. P. 263–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.043>

14. Ethanol-Fueled Low Temperature Combustion: A Pathway to Clean and Efficient Diesel Engine Cycles / U. Asad [et al.] // Applied Energy. 2015. Vol. 157. P. 838–850. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.057>

15. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Features of the Development of Fuel Flares When Running Diesel on Alcohol [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062004>
16. Experimental Investigation of Ethanol/Diesel Dual-Fuel Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine [Электронный ресурс] / J. Han [et al.] // Fuel. 2020. Vol. 275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867>
17. Comparative Study on the Combustion and Emissions of Dual-Fuel Common Rail Engines Fueled with Diesel/Methanol, Diesel/Ethanol, and Diesel/N-Butanol [Электронный ресурс] / Z. Chen [et al.] // Fuel. 2021. Vol. 304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121360>
18. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Effective Indicators of Diesel Powered by Natural Gas and Alcohol-Fuel [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 548. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062028>
19. Asad U., Zheng M. Exhaust Gas Recirculation for Advanced Diesel Combustion Cycles // Applied Energy. 2014. Vol. 123. P. 242–252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.073>
20. Fuel Injection Strategies to Improve Emissions and Efficiency of High Compression Ratio Diesel Engines / U. Asad [et al.] // SAE Int. J. Engines. 2009. Vol. 1, Issue 1. P. 1220–1233. doi: <https://doi.org/10.4271/2008-01-2472>
21. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Alcohol Biofuels for Internal Combustion Engine [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 548. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062041>
22. Фомин В. М., Хакимов Р. Р., Шевченко Д. В. Водород как химический реагент в кинетическом механизме образования углерода в дизеле // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 3. С. 10–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16533918> (дата обращения: 02.04.2022).
23. Low Temperature Autoignition of Diesel Fuel under Dual Operation with Hydrogen and Hydrogen-Carriers [Электронный ресурс] / J. J. Hernández [et al.] // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115516>
24. Effect of Ethanol on the Chemistry of Formation of Precursors of Polyaromatic Hydrocarbons in a Fuel-Rich Ethylene Flame at Atmospheric Pressure / I. E. Gerasimov [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2012. Vol. 48. P. 661–676. doi: <https://doi.org/10.1134/S0010508212060019>
25. Kurczyński D. Effect of the Rome Biodiesel on the Diesel Engine Fuel Consumption and Emission // Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. 2021. Vol. 23, Issue 4. P. 308–316. doi: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.4.B308-B316>
26. Numerical Study for the Spray Characteristics of Diesel Engine Powered by Biodiesel Fuels under Different Injection Pressures / M. F. Al-Dawody [et al.] // Journal of Engineering Research. 2022. Vol. 10, Issue 1B. P. 264–289. doi: <https://doi.org/10.36909/jer.9821>
27. Alcantara-Carmona A., López-Jiménez F. J., Dorado M. P. Compatibility Studies between an Indirect Injection Diesel Injector and Biodiesel with Different Composition: Stationary Tests [Электронный ресурс] // Fuel. 2022. Vol. 307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121788>
28. Influence of Non-Uniformity of Fuel Supply Parameters on Diesel Engine Performance [Электронный ресурс] / A. K. Arazehiv [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1679. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042063>
29. Xia M., Zhang F. Application of Multi-Parameter Fuzzy Optimization to Enhance Performance of a Regulated Two-Stage Turbocharged Diesel Engine Operating at High Altitude [Электронный ресурс] // Energies. 2020. Vol. 13, Issue 17. doi: <https://doi.org/10.3390/en13174278>
30. Operational Parameters of a Diesel Engine Running on Diesel-Rapeseed Oil-Methanol-Iso-Butanol Blends [Электронный ресурс] / J. Čedík [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14, Issue 19. doi: <https://doi.org/10.3390/en14196173>
31. Labeckas G., Slavinskas S. Comparative Evaluation of the Combustion Process and Emissions of a Diesel Engine Operating on the Cetane Improver 2-Ethylhexyl Nitrate Doped Rapeseed Oil and Aviation JP-8 Fuel [Электронный ресурс] // Energy Conversion and Management: X. 2021. Vol. 11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100106>

32. A Comparative Analysis of Emissions from a Compression-Ignition Engine Powered by Diesel, Rapeseed Biodiesel, and Biodiesel from *Chlorella Protothecoides* Biomass Cultured under Different Conditions [Электронный ресурс] / M. Dębowski [et al.] // Atmosphere. 2021. Vol. 12, Issue 9. doi: <https://doi.org/10.3390/ATMOS12091099>

33. Rayapureddy S. M., Matijošius J., Rimkus A. Comparison of Research Data of Diesel–Biodiesel–Isopropanol and Diesel–Rapeseed Oil–Isopropanol Fuel Blends Mixed at Different Proportions on a CI Engine [Электронный ресурс] // Sustainability. 2021. Vol. 13, Issue 18. doi: <https://doi.org/10.3390/su131810059>

34. Likhonov V. A., Lopatin O. P. Development of Environmentally Friendly Alcohol-Fuel Emulsions for Diesel Engines // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1515. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042019>

*Поступила 05.04.2022; одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 01.06.2022*

*Об авторах:*

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

**Лопатин Олег Петрович**, профессор кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: [AAD-8374-2019](https://orcid.org/AAD-8374-2019), [nirs\\_vsaa@mail.ru](mailto:nirs_vsaa@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

В. А. Лиханов – научное руководство, анализ и доработка текста.

О. П. Лопатин – формирование структуры статьи, анализ литературных данных, описание методов и способов снижения дымности, редактирование текста, составление выводов и заключения.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Green L., Dierschke K., Mattsson F., et al. Lung Function and Self-Rated Symptoms in Healthy Volunteers after Exposure to Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Exhaust with and without Particles. *Particle and Fibre Toxicology*. 2022;19(9). doi: <https://doi.org/10.1186/s12989-021-00446-7>

2. Wong P.K., Ghadikolaei M.A., Chen S.H., et al. Physicochemical and Cell Toxicity Properties of Particulate Matter (PM) from a Diesel Vehicle Failed with Diesel, Spent Coffee Ground Biodiesel, and Ethanol. *Science of the Total Environment*. 2022;824. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153873>

3. Agarwal A.K., Kumar V., Ankur Kalwar A.J. Fuel Injection Strategy Optimisation and Experimental Performance and Emissions Evaluation of Diesel Displacement by Port Fuel Injected Methanol in a Retrofitted Mid-Size Genset Engine Prototype. *Energy*. 2022;248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123593>

4. Teoh Y.H., Yaqoob H., How G., et al. Comparative Assessment of Performance, Emissions and Combustion Characteristics of Tire Pyrolysis Oil-Diesel and Biodiesel-Diesel Blends in a Common-Rail Direct Injection Engine. *Fuel*. 2022;313. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123058>

5. Chan A.F.E., Yahya W.J., Kadir H.A., et al. Performance and Emissions of Neat Crude Palm Oil and Its Emulsions as Diesel Engine Fuel. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 2022;41(2). doi: <https://doi.org/10.1002/ep.13749>

6. Roshia P., Kumar S., Kumar P.S., et al. Impact of Compression Ratio on Combustion Behavior of Hydrogen Enriched Biogas-Diesel Operated CI Engine. *Fuel*. 2022;310-B. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122321>

7. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Biofuels or Smoking Cars? *Theoretical and Applied Ecology*. 2021;(3):228–236. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-228-236>
8. Orebayeva A.A. Bioethanol Production from Renewable Raw Materials. *Ustoychivoye razvitiye nauki i obrazovaniya*. 2021;(12):18–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47936391> (accessed 04.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Wang S., Viswanathan K., Esakkimuthu S., Azad K. Experimental Investigation of High Alcohol Low Viscous Renewable Fuel in DI Diesel Engine. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(10):12026–12040. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08298-y>
10. Markov V.A., Sa B., Devyanin S.N., et al. Investigation of the Performances of a Diesel Engine Operating on Blended and Emulsified Biofuels from Rapeseed Oil. *Energies*. 2021;14(20). doi: <https://doi.org/10.3390/en14206661>
11. Lopatin O.P. Investigation of Alternative Fuel Oxidation Kinetics in an Internal Combustion Engine. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062005>
12. Verhelst S., Turner J., Sileghem L., Vancoillie J. Methanol as a Fuel for Internal Combustion Engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019;70:43–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.10.001>
13. Pedrozo V.B., May I., Zhao H. Exploring the Mid-Load Potential of Ethanol-Diesel Dual-Fuel Combustion with and without EGR. *Applied Energy*. 2017;193:263–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.043>
14. Asad U., Kumar R., Zheng M., Tjong J. Ethanol-Fueled Low Temperature Combustion: A Pathway to Clean and Efficient Diesel Engine Cycles. *Applied Energy*. 2015;157:838–850. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.057>
15. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Features of the Development of Fuel Flares When Running Diesel on Alcohol. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062004>
16. Han J., Somers L.M.T., Cracknell R., et al. Experimental Investigation of Ethanol/Diesel Dual-Fuel Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine. *Fuel*. 2020;275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867>
17. Chen Z., He J., Chen H., et al. Comparative Study on the Combustion and Emissions of Dual-Fuel Common Rail Engines Fueled with Diesel/Methanol, Diesel/Ethanol, and Diesel/N-Butanol. *Fuel*. 2021;304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121360>
18. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Effective Indicators of Diesel Powered by Natural Gas and Alcohol-Fuel. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 548. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062028>
19. Asad U., Zheng M. Exhaust Gas Recirculation for Advanced Diesel Combustion Cycles. *Applied Energy*. 2014;123:242–252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.073>
20. Asad U., Zheng M., Han X., et al. Fuel Injection Strategies to Improve Emissions and Efficiency of High Compression Ratio Diesel Engines. *SAE Int. J. Engines*. 2009;1(1):1220–1233. doi: <https://doi.org/10.4271/2008-01-2472>
21. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Alcohol Biofuels for Internal Combustion Engine. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 548. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062041>
22. Fomin V.M., Khakimov R.R., Shevchenko D.V. About a Role of Hydrogen as Chemical Reagent in the Kinetic Mechanism of Formation of Carbon in a Diesel Engine. *Transport na alternativnom toplive*. 2011;(3):10–13. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16533918> (accessed 02.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Hernández J.J., Cova-Bonillo A., Wu H., et al. Low Temperature Autoignition of Diesel Fuel under Dual Operation with Hydrogen and Hydrogen-Carriers. *Energy Conversion and Management*. 2022;258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115516>
24. Gerasimov I.E., Knyazkov D.A., Yakimov S.A., et al. Effect of Ethanol on the Chemistry of Formation of Precursors of Polyaromatic Hydrocarbons in a Fuel-Rich Ethylene Flame at Atmospheric

Pressure. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2012;48:661–676. doi: <https://doi.org/10.1134/S0010508212060019>

25. Kurczyński D. Effect of the Rome Biodiesel on the Diesel Engine Fuel Consumption and Emission. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2021;23(4):308–316. doi: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.4.B308-B316>

26. Al-Dawody M.F., Al-Farhany K., Hamza N.H., Hamza D.A. Numerical Study for the Spray Characteristics of Diesel Engine Powered by Biodiesel Fuels under Different Injection Pressures. *Journal of Engineering Research*. 2022;10(1B):264–289. doi: <https://doi.org/10.36909/jer.9821>

27. Alcantara-Carmona A., López-Jiménez F.J., Dorado M.P. Compatibility Studies between an Indirect Injection Diesel Injector and Biodiesel with Different Composition: Stationary Tests. *Fuel*. 2022;307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121788>

28. Apazehiv A.K., Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I., Shekikhacheva L.Z. Influence of Non-Uniformity of Fuel Supply Parameters on Diesel Engine Performance. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042063>

29. Xia M., Zhang F. Application of Multi-Parameter Fuzzy Optimization to Enhance Performance of a Regulated Two-Stage Turbocharged Diesel Engine Operating at High Altitude. *Energies*. 2020;13(17). doi: <https://doi.org/10.3390/en13174278>

30. Čedík J., Pexa M., Holúbek M., et al. Operational Parameters of a Diesel Engine Running on Diesel-Rapeseed Oil-Methanol-Iso-Butanol Blends. *Energies*. 2021;14(19). doi: <https://doi.org/10.3390/en14196173>

31. Labeckas G., Slavinskas S. Comparative Evaluation of the Combustion Process and Emissions of a Diesel Engine Operating on the Cetane Improver 2-Ethylhexyl Nitrate Doped Rapeseed Oil and Aviation JP-8 Fuel. *Energy Conversion and Management: X*. 2021;11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100106>

32. Dębowski M., Michalski R., Zieliński M., Kazimierowicz J. A Comparative Analysis of Emissions from a Compression-Ignition Engine Powered by Diesel, Rapeseed Biodiesel, and Biodiesel from *Chlorella Protothecoides* Biomass Cultured under Different Conditions. *Atmosphere*. 2021;12(9). doi: <https://doi.org/10.3390/ATMOS12091099>

33. Rayapureddy S.M., Matijošius J., Rimkus A. Comparison of Research Data of Diesel–Biodiesel–Isopropanol and Diesel–Rapeseed Oil–Isopropanol Fuel Blends Mixed at Different Proportions on a CI Engine. *Sustainability*. 2021;13(18). doi: <https://doi.org/10.3390/su131810059>

34. Likhonov V.A., Lopatin O.P. Development of Environmentally Friendly Alcohol-Fuel Emulsions for Diesel Engines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042019>

*Submitted 05.04.2022; approved after reviewing 16.05.2022; accepted for publication 01.06.2022*

#### *About the authors:*

**Vitaly A. Likhonov**, Head of the Chair of Thermal Engines of Automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-7176>, Researcher ID: AGN-7347-2022, [lihanov.va@mail.ru](mailto:lihanov.va@mail.ru)

**Oleg P. Lopatin**, Professor of the Chair of Thermal Engines of Automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: AAD-8374-2019, [nirs\\_vsaa@mail.ru](mailto:nirs_vsaa@mail.ru)

#### *Contribution of the authors:*

V. A. Likhonov – scientific guidance, analysis and revision of the text.

O. P. Lopatin – formation of the structure of the article, analysis of literary data, description of methods and ways to reduce smoke, text editing, drawing conclusions and conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*