

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-320931>

Оригинальное исследование



Исследование процесса сгорания в тракторном дизеле при работе на спирте и растительном масле

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин

Вятский государственный агротехнологический университет, Киров, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Тракторные дизели широко используются в сельском хозяйстве, в промышленности на транспорте благодаря их высокой эффективности, надежности, технологичности и экономичности. Тем не менее, постоянно увеличивающийся автотракторный парк является одной из основных причин загрязнения окружающей среды и роста потребления нефтяного моторного топлива. В настоящей работе обосновано применение, подходящего по своим физико-химическим характеристикам и свойствам для эффективного и экологичного сгорания в тракторном дизеле, альтернативного топлива – этилового спирта и рапсового масла.

Цель работы — исследование процесса сгорания в тракторном дизеле, работающем на этиловом спирте и рапсовом масле, установление зависимостей влияния режимов работы тракторного дизеля на показатели процесса сгорания и определение их числовых характеристик.

Материалы и методы. Экспериментальный образец тракторного дизеля был переоборудован для работы на этиловом спирте и рапсовом масле. Этанол использовался в качестве основного топлива и воспламенялся от поступающей в камеру сгорания дизеля струи рапсового масла. Этиловый спирт имеет меньшую теплотворную способность по сравнению с дизельным топливом, следовательно, возникла потребность в определении оптимальной цикловой подачи запальной порции рапсового масла и исследовании показателей процесса сгорания.

Результаты. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния применения этилового спирта и рапсового масла в качестве запального (пилотного) топлива на показатели процесса сгорания тракторного дизеля. Определена оптимальная величина цикловой подачи рапсового масла, уменьшение величины которой от оптимального значения приводит к росту температуры отработавших газов, удельного эффективного и суммарного расходов топлива, ухудшает процесс сгорания, а увеличение – ухудшает экологические показатели тракторного дизеля, в том числе, дымность отработавших газов. Представлены результаты научных исследований по определению оптимальных установочных углов опережения впрыскивания этилового спирта и рапсового масла.

Заключение. Достигнуто полное замещение нефтяного дизельного топлива альтернативными видами топлива без внесения существенных изменений в конструкцию тракторного дизеля, улучшение его экологических характеристик при сохранении мощностных показателей на уровне серийного дизеля. На основании проведенных исследований рабочего процесса тракторного дизеля на этиловом спирте и рапсовом масле установлены зависимости влияния его режимов работы на показатели процесса сгорания и определены их числовые характеристики.

Ключевые слова: тракторный дизель; этиловый спирт; рапсовое масло; процесс сгорания.

Как цитировать:

Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование процесса сгорания в тракторном дизеле при работе на спирте и растительном масле // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 3. С. 191–200. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-320931>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-320931>

Original Study Article

Research of the combustion process in a tractor diesel engine when operating on alcohol and vegetable oil

Vitaly A. Likhanov, Oleg P. Lopatin

Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Tractor diesels are widely used in agriculture, industry and transport due to their high efficiency, reliability, manufacturability and economy. Nevertheless, the ever-increasing tractor fleet is one of the main causes of environmental pollution and the increase in the consumption of petroleum motor fuel. The paper substantiates the use of an alternative fuel, suitable in its physical and chemical characteristics and properties for efficient and environmentally friendly combustion in a tractor diesel, such as ethanol and rapeseed oil.

AIMS: Research of the combustion process in a tractor diesel engine operating on ethanol and rapeseed oil, establishment the dependencies of the influence of tractor diesel operating modes on the combustion process indicators and determination of their numerical characteristics.

METHODS: An experimental sample of a tractor diesel engine was converted for operation on ethanol and rapeseed oil. Ethanol was used as the main fuel and was ignited with a jet of rapeseed oil entering the diesel combustion chamber. Ethanol has a lower calorific value compared to diesel fuel, therefore, there was a need to determine the optimal cyclic supply of the ignition portion of rapeseed oil and to study the indicators of the combustion process.

RESULTS: The results of experimental studies of the effect of the use of ethanol and rapeseed oil as a pilot fuel on the indicators of the combustion process of tractor diesel are presented. The optimal value of the cyclic supply of rapeseed oil has been determined, a decrease in the value of which from the optimal value leads to an increase in exhaust gas temperature, specific effective and total fuel consumption, worsens the combustion process, while an increase of it worsens the environmental performance of a tractor diesel engine, including the smokiness of exhaust gases. The results of scientific research on the determination of optimal installation angles of advance injection of ethanol and rapeseed oil are presented.

CONCLUSIONS: The complete replacement of petroleum diesel fuel with alternative fuels has been achieved without making significant changes to the design of a tractor diesel engine, improving its environmental characteristics while maintaining power indicators at the level of a serial diesel. On the basis of the conducted studies of the operating process of a tractor diesel engine on ethanol and rapeseed oil, the dependencies of the influence of its operating modes on the indicators of the combustion process are established and their numerical characteristics are determined.

Keywords: tractor diesel engine; ethanol; rapeseed oil; combustion process.

To cite this article:

Likhanov VA, Lopatin OP. Research of the combustion process in a tractor diesel engine when operating on alcohol and vegetable oil. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(3):191–200. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-320931>

Received: 08.02.2023

Accepted: 01.06.2023

Published online: 15.07.2023

СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.

Условные обозначения в подрисуночных надписях:

PM – рапсовое масло

Э – этанол

КИВ – коэффициент избытка воздуха

КС – камера сгорания

ОГ – отработавшие газы

КПД – коэффициент полезного действия

ПЗВ – период задержки воспламенения

ВМТ – верхняя мертвая точка

УУОВ – установочный угол опережения впрыскивания

q_3 – цикловая подача запального рапсового масла

$G_Э$ – часовой расход этанола, кг/ч

G_{PM} – часовой расход рапсового масла, кг/ч

$G_{T\Sigma}$ – суммарный расход топлива (этанол+рапсовое масло), кг/ч

n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹

p_e – среднее эффективное давление, МПа

p_z – максимальное давление цикла, МПа

$\Theta_Э$ – установочный угол опережения впрыскивания этанола, град

Θ_{PM} – установочный угол опережения впрыскивания рапсового масла, град

ВВЕДЕНИЕ

Неизбежность энергетического кризиса, вызванного неуклонным ростом потребления исчерпаемых энергоресурсов, вынуждает человечество искать альтернативные возобновляемые источники энергии, а активное их использование, безусловно, приведет к снижению экологического ущерба, наносимого окружающей среде при сгорании традиционных топлив в автотракторных мобильных энергетических средствах [1–3].

Автотракторный парк является одним из основных источников загрязнения окружающей среды, особенно в крупных городах, где его доля в суммарном загрязнении воздушного бассейна может превышать 90%, а его эксплуатация сопровождается значительным загрязнением токсичными компонентами, выделяемыми отработавшими газами (ОГ) мобильными энергетическими средствами всей окружающей среды (атмосферного воздуха, водной среды, почв, сельхозпродукции и т.д.) [4–6].

Поскольку Российская Федерация обладает не только значительным потенциалом в области развития производства возобновляемых источников энергии, но и, в том числе, крупнейшей в мире площадью пахотных земель, то целесообразно рассматривать в качестве альтернативных источников энергии топлива с возможностью получения их из расщепительного сырья. Такими топливами, подходящими по своим физико-химическим характеристикам и свойствам для эффективного и экологичного сгорания в тракторном дизеле, являются этиловый спирт и рапсовое масло (PM) [7, 8].

Цель работы – исследование процесса сгорания в тракторном дизеле, работающем на этиловом спирте и рапсовом масле, установление зависимостей влияния режимов работы тракторного дизеля на показатели процесса сгорания и определение их числовых характеристик.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В Вятском государственном агротехнологическом университете на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования рабочего процесса и разработана модификация экспериментального образца тракторного дизеля Д-21А1 (2Ч 10,5/12,0) для работы на этиловом спирте и PM с использованием отдельных систем топливоподачи [7–9]. Тракторный дизель оснащен полусферической камерой сгорания в поршне. Этанол использовался в качестве основного топлива и воспламенялся от, поступающей в камеру сгорания тракторного дизеля, струи PM. Этиловый спирт имеет меньшую теплотворную способность по сравнению с дизельным топливом (ДТ), следовательно, возникла потребность в определении оптимальной цикловой подачи запальной порции PM, при которой тракторный дизель устойчиво работает на всех режимах, и при этом эффективные, экологические показатели были бы оптимальными.

Минимальная подача запального топлива q_3 , при которой двигатель работает без пропусков воспламенения на номинальном режиме работы составляет 8,3 мг/цикл (0,9 кг/ч) при $n=1800$ мин⁻¹ и 6,1 мг/цикл (0,51 кг/ч) при $n=1400$ мин⁻¹. С увеличением запальной порции PM, соответственно, уменьшалась цикловая подача этилового спирта. Так, при минимальной подаче запального топлива расход этанола на номинальном режиме работы составил 7,3 кг/ч (67 мг/цикл). При увеличении подачи PM до 2,1 кг/ч (19,4 мг/цикл) расход этанола составил 5,2 кг/ч (48 мг/цикл). Наилучшие значения эффективных показателей работы двигателя достигаются при цикловой подаче PM в диапазоне от 11 до 14 мг/цикл. На номинальном режиме работы при подаче запальной порции 11,7 мг/цикл суммарный расход топлива $G_{T\Sigma}=7,06$ кг/ч, расход этанола, $G_Э=5,81$ кг/ч, суммарный удельный эффективный расход топлива $g_{e\Sigma}=384,5$ г/кВт, удельный эффективный КПД $\eta_e=0,324$ (рис. 1).

На режиме максимального крутящего момента максимальный эффективный КПД $\eta_e=0,334$ был достигнут при $q_3=12,5$ мг/цикл. При этом суммарный расход топлива составил $G_{T\Sigma}=4,92$ кг/ч, а расход этанола – $G_Э=3,87$ кг/ч. Дальнейшее увеличение цикловой подачи PM ведет к уменьшению общего расхода топлив. Так, при цикловой подаче PM $q_3=15,5$ мг/цикл расход этанола равен $G_Э=3,54$ кг/ч, соответственно, суммарный расход – $G_{T\Sigma}=4,84$ кг/ч. Однако эффективный КПД при этом незначительно падает и составляет $\eta_e=0,32$.

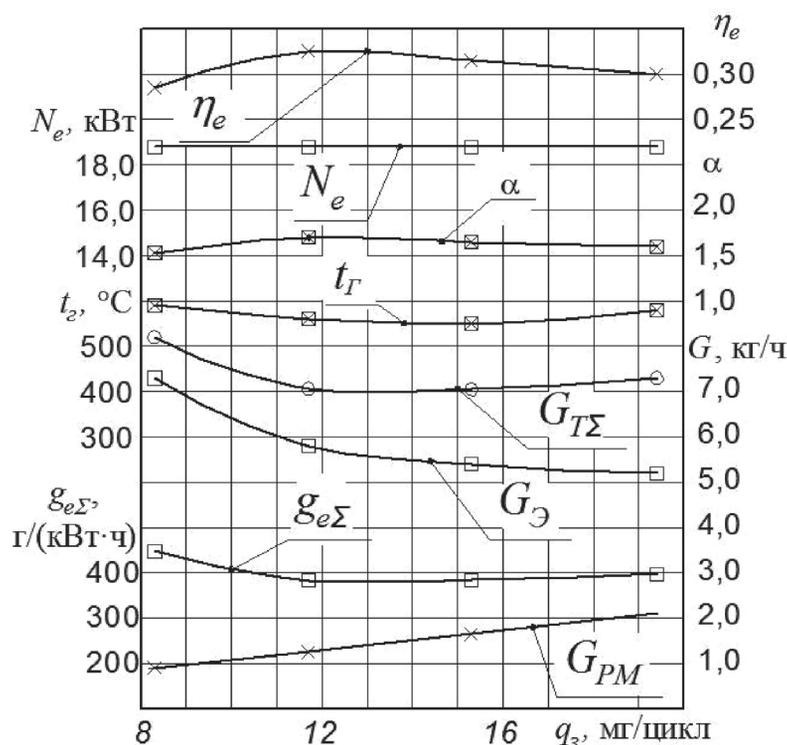


Рис. 1. Влияние величины запальной порции РМ на эффективные показатели тракторного дизеля Д21А1 ($n=1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e=0,588 \text{ МПа}$).

Fig. 1. The effect of the size of the ignition portion of rapeseed oil on the effective performance of the D21A1 tractor diesel engine ($n=1800 \text{ min}^{-1}$ and $p_e=0.588 \text{ MPa}$).

Максимальное значение коэффициента избытка воздуха (КИВ) было получено $\alpha=1,72$ при $q_3=11,7 \text{ мг/цикл}$ при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$.

С ростом цикловой подачи этанола увеличивается длительность топливоподачи, тем самым замедляется процесс испарения, возникает больше переобогащенных зон в топливном факеле этанола, падает локальный КИВ в зоне термического распада. Вместе с тем, необходимо учитывать изменение геометрических параметров топливного факела, а также увеличение его объема. Одновременно с этим уменьшается подача РМ, ухудшается качество распыливания топлива в камере сгорания (КС) штифтовой форсункой. Вследствие чего растет период задержки воспламенения (ПЗВ), процесс сгорания смещается на линию расширения, растет температура ОГ. Все вышесказанное приводит к увеличению суммарной подачи топлива и снижению КИВ. Ввиду поздней инициации процесса сгорания уменьшается не только эффективный КПД, но и значительно падает тепловыделение, что свидетельствует о неполном сгорании топлива.

С увеличением цикловой подачи РМ улучшается характеристика распыла топлива, снижается неравномерность подачи по цилиндрам, уменьшается ПЗВ. При этом растет полнота сгорания топлива и эффективный КПД, растет осредненная температура газов в цилиндре (рис. 2, а), уменьшается степень гомогенизации смеси в начальный период сгорания, растет масса топлива, сгорающего в диффузионном пламени. При цикловых порциях РМ

свыше 16 мг/цикл возрастает дальнобойность топливного факела, часть которого может оседать на стенках КС, что ухудшает процесс смесеобразования и приводит к повышенному суммарному расходу топлива и увеличению сажеобразования. С увеличением подачи запального топлива растет максимальное давление сгорания p_z от $5,24 \text{ МПа}$ при цикловой подаче РМ $q_3=8,3 \text{ мг/цикл}$ до $6,44 \text{ МПа}$ при $q_3=19,4 \text{ мг/цикл}$ на номинальной частоте вращения коленчатого вала (рис. 2, б).

При росте порции запального топлива свыше 16 мг/цикл процесс сгорания ухудшается, что отражается в снижении активного тепловыделения и росте суммарного количества потребляемого топлива. Это вызвано ростом количества запального топлива, попадающего на стенки КС. Увеличивается длительность испарения топлива и растет продолжительность сгорания.

Таким образом, экспериментально установлено, исходя из эффективных показателей дизеля целесообразно установить подачу запального топлива $q_3=13 \text{ мг/цикл}$. С уменьшением величины запальной порции растет температура ОГ, удельный эффективный и суммарный расход топлива, ухудшается процесс сгорания. При увеличении запальной порции ухудшаются экологические показатели тракторного дизеля, растет дымность ОГ. Дальнейшие исследования проводились при цикловой подаче РМ $q_3=13 \text{ мг/цикл}$, что соответствует часовому расходу РМ $G_{PM}=1,4 \text{ кг/ч}$ на номинальном режиме работы.

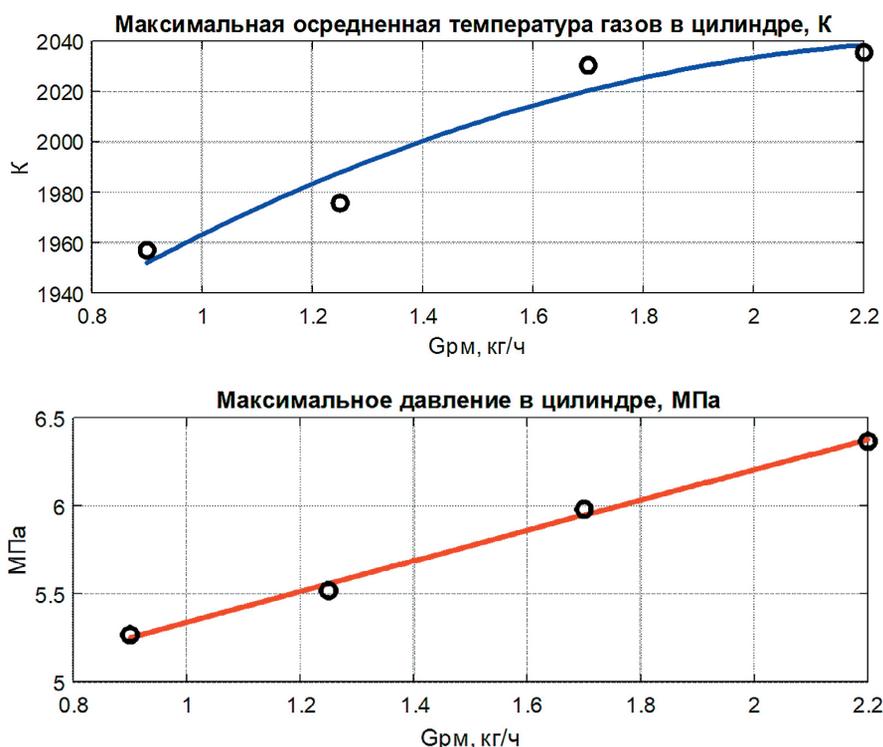


Рис. 2. Влияние расхода РМ на показатели процесса сгорания: *a* – максимальной осредненной температуры газов, К; *b* – максимального индикаторного давления в цилиндре, МПа.

Fig. 2. The influence of rapeseed oil consumption on the combustion process indicators: *a* – the maximal averaged gas temperature, K; *b* – the maximal indicator pressure in a cylinder, MPa.

После определения запальной порции РМ определялось оптимальное сочетание установочных углов опережения впрыскивания (УУОВ) РМ и этанола.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

УУОВ оказывает сильное влияние на процесс сгорания. Со смещением УУОВ запального топлива от верхней мертвой точки (ВМТ) с 30 градусов поворота коленчатого вала (п.к.в.) до 38 п.к.в. максимальное давление в цилиндре растет, точка отрыва диаграммы от линии сжатия и пиковое давление в цилиндре (p_z) смещается влево на 5 градусов п.к.в. (рис. 3, *a*). Рост давления с увеличением УУОВ РМ вызван интенсификацией горения топлива в окрестностях ВМТ.

При изменении УУОВ этанола при постоянном моменте впрыска РМ смещение характерных точек на индикаторной диаграмме относительно ВМТ менее существенно (рис. 3, *b*). При раннем впрыске этанола индикаторное давление растет за счет выделения большего количества тепла в период гомогенного сгорания. Начало сгорания зависит от момента впрыска запального топлива, несмотря на то, что этанол ингибирует процесс воспламенения.

На рис. 4 представлены результаты двумерной регрессии экспериментальных данных измерения

максимального давления газов в цилиндре p_z в зависимости от УУОВТ при работе дизеля на этаноле и РМ.

Экспериментально установлено, что изменение максимального давления при постоянном УУОВ этанола в зависимости от УУОВ РМ менее выражено, особенно при поздних углах подачи этанола. С увеличением УУОВ этанола растет и влияние УУОВ РМ. Максимальное значение p_z достигается при $\Theta_{\text{э}}=38^\circ$ и $\Theta_{\text{РМ}}=42^\circ$ и составляет $p_z=7,72$ МПа.

Изменение УУОВ РМ вызывает соответствующее смещение функции осредненной температуры газов в цилиндре (рис. 5). При более ранней подаче пик температуры достигается раньше. Максимальная температура газов при этом существенно не меняется.

При постоянном УУОВ запального топлива, варьируя значения УУОВ этанола, мы наблюдаем рост максимальной индикаторной температуры газов в цилиндре при ранней подаче спирта. Это вызвано также приведенными выше причинами: энергетической насыщенностью порций топлива и разными цетановыми числами РМ и этилового спирта.

Максимальная температура газов растет с увеличением УУОВ этанола при всех УУОВ запального топлива. При поздних углах подачи РМ рост максимальной осредненной температуры газов в цилиндре более интенсивный, чем при ранних углах ($\Theta_{\text{РМ}}=42^\circ$). Наибольшие значения T_{max} достигаются при $\Theta_{\text{э}}=38^\circ$ п.к.в. до ВМТ (рис. 6).

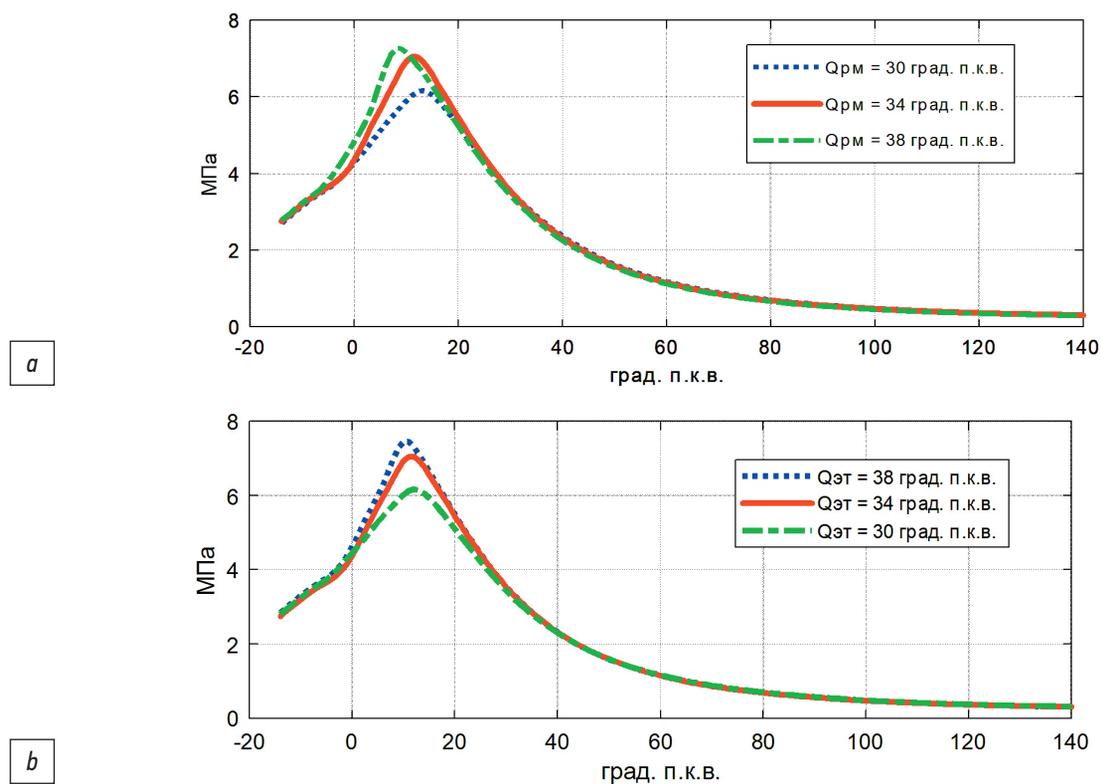


Рис. 3. Давление газов в цилиндре тракторного дизеля при работе на этиловом спирте и РМ при различных УУОВ: $a - \Theta_E = 34^\circ$; $b - \Theta_{PM} = 34^\circ$.

Fig. 3. The gas pressure in a cylinder of the tractor diesel engine when operating on ethanol and rapeseed oil at various setting angles of fuel injection advance: $a - \Theta_E = 34^\circ$; $b - \Theta_{RO} = 34^\circ$.

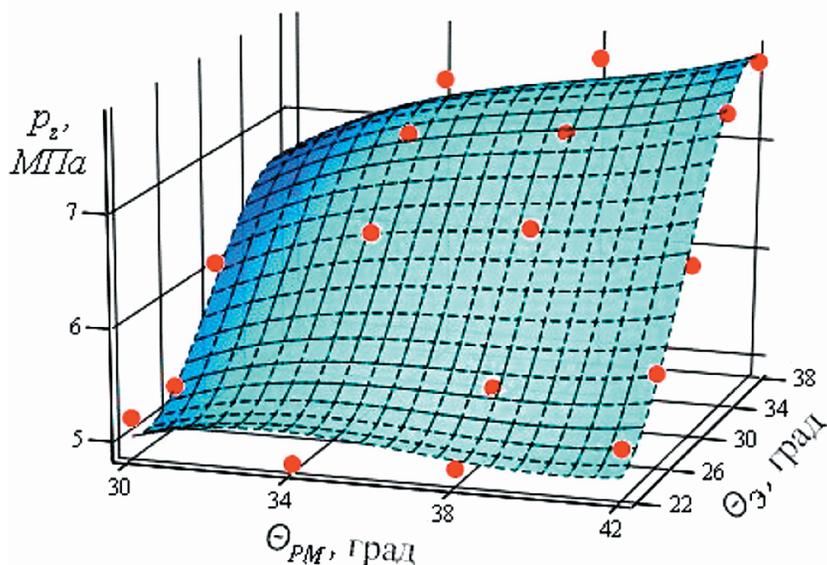
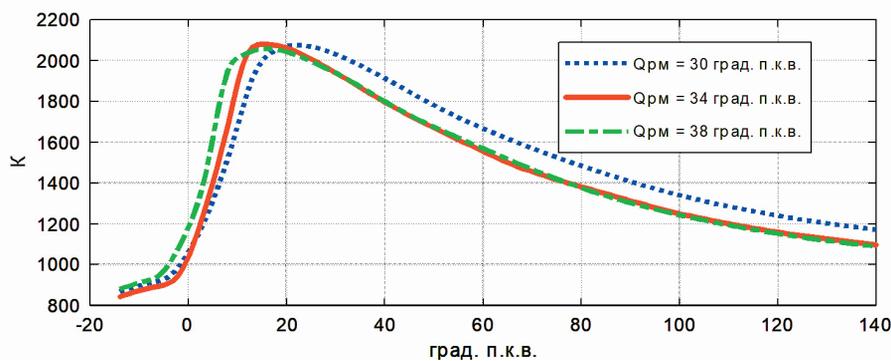
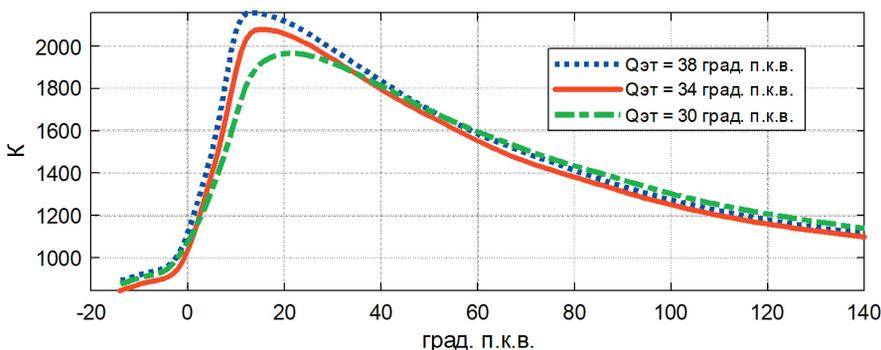


Рис. 4. Изменение максимального давления сгорания в цилиндре дизеля Д21А1 при работе на этиловом спирте и РМ.

Fig. 4. Change in the maximum combustion pressure in a cylinder of the D21A1 diesel engine when operating on ethanol and rapeseed oil.



a



b

Рис. 5. Осредненная температура газов в цилиндре тракторного дизеля при работе на этиловом спирте и РМ: $a - \Theta_E=34^\circ$; $b - \Theta_{PM}=34^\circ$.

Fig. 5. The averaged gas temperature in a cylinder of the tractor diesel engine when operating on ethanol and rapeseed oil: $a - \Theta_E=34^\circ$; $b - \Theta_{RO}=34^\circ$.

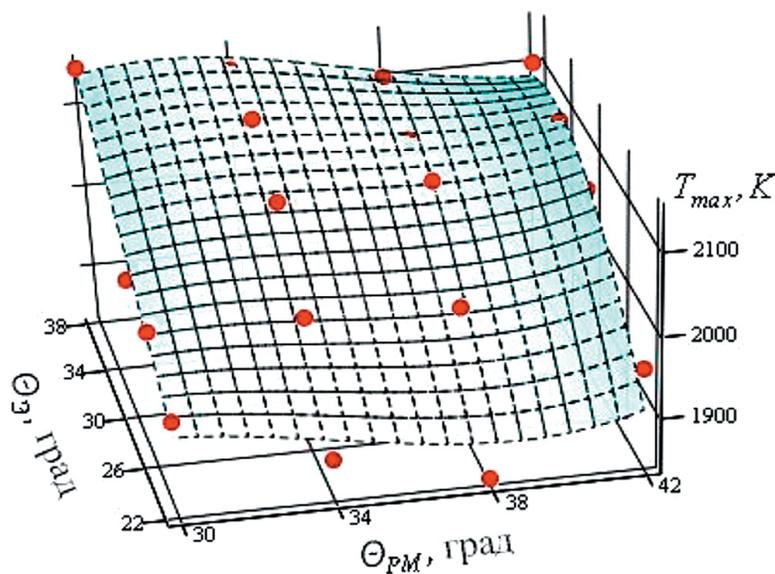


Рис. 6. Изменение максимальной осредненной температуры газов в цилиндре тракторного дизеля Д21А1 при работе на этаноле и РМ.

Fig. 6. Change in the maximal average gas temperature in a cylinder of the D21A1 tractor diesel engine when operating on ethanol and rapeseed oil.

Влияние УУОВ РМ на максимальную осредненную температуру газов в цилиндре имеет сложный характер. Это вызвано, в том числе, различной степенью сгорания топлив и увеличением подачи топлив при неэффективной организации процесса сгорания в цилиндре на неоптимальных УУОВТ. Наибольшие значения температур достигаются при $\Theta_{PM}=30^\circ$ и $\Theta_{PM}=34^\circ$ на ранних УУОВ этанола.

Анализируя значения основных показателей процесса сгорания p_z и T_{max} в зависимости от УУОВ топлив можно отметить следующее:

- Значения этих параметров сильно зависят от УУОВ этанола и в меньшей степени от изменения УУОВ РМ.
- Слишком высокие значения максимального давления и осредненной температуры газов, при ранних УУОВ этанола, негативно сказываются на долговечности деталей двигателя, ведут к увеличению шумности работы дизеля и появлению стуков, повышается максимальная скорость роста давления в цилиндре.
- Слишком поздние углы подачи этанола сдвигают процесс сгорания на линию расширения, что приводит к росту температуры ОГ, повышенному удельному эффективному расходу топлива, снижению эффективного КПД.

При работе тракторного дизеля на этиловом спирте и РМ максимальное значение осредненной температуры газов T_{max} в цилиндре на максимальных нагрузках выше, чем при работе на ДТ (рис. 7, а) Равенство температур достигается при $p_e=0,4$ МПа. Вместе с тем, при малых нагрузках максимальная температура в цилиндре при работе тракторного дизеля на этаноле и РМ достигается значительно позднее, чем при работе на ДТ (рис. 7, с). Это признаки позднего сгорания, что является причиной снижения эффективности работы дизеля на этаноле и РМ на малых нагрузках. Увеличение подачи этанола улучшает процесс сгорания, угол максимальной температуры газов смещается к ВМТ, растет максимальная температура газов в цилиндре.

Также при работе двигателя на этаноле и РМ происходит более интенсивный рост максимального давления сгорания с увеличением нагрузки (рис. 7, b). Максимальное давление при $p_e=0,115$ МПа $p_z=3,91$ МПа, при $p_e=0,692$ МПа $p_z=8,1$ МПа. При нагрузках при $p_e < 0,500$ МПа максимальное давление p_z в цилиндре при работе дизеля на альтернативных топливах ниже, чем при работе на ДТ. Значения максимального давления газов в цилиндре дизеля при работе на ДТ растет с $p_z=5,1$ МПа при $p_e=0,115$ МПа до $p_z=7,85$ МПа

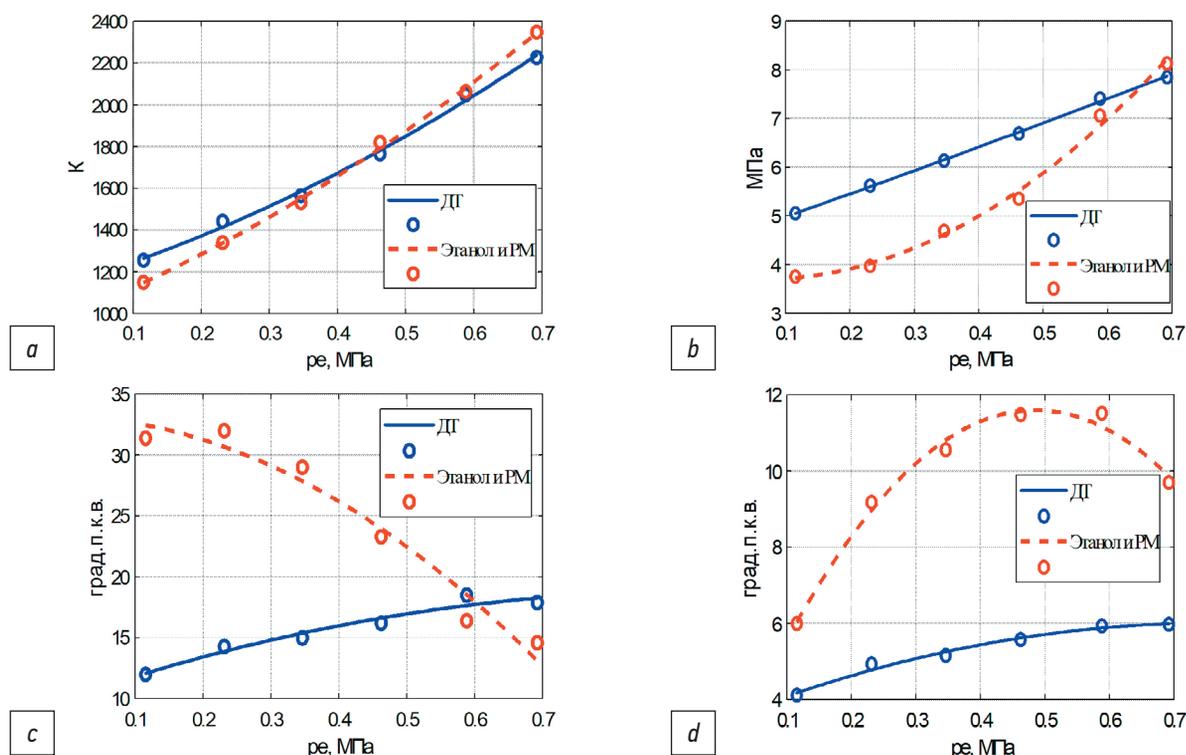


Рис. 7. Показатели процесса сгорания при работе тракторного дизеля Д21А1 в зависимости от нагрузки: *a* – максимальная осредненная температура газов в цилиндре; *b* – максимальное давление в цилиндре; *c* – угол п.к.в., соответствующий максимальной осредненной температуре газов в цилиндре град.; *d* – угол п.к.в., соответствующий максимальному давлению газов в цилиндре, град.

Fig. 7. Indicators of the combustion process during operation of the D21A1 tractor diesel engine depending on the load: *a* – the maximal averaged gas temperature in a cylinder; *b* – the maximal pressure in a cylinder; *c* – the crankshaft rotation angle corresponding to the maximal averaged gas temperature in a cylinder, deg; *d* – the crankshaft rotation angle corresponding to the maximal gas pressure in a cylinder, deg.

при $p_e = 0,692$ МПа. Угол град. п.к.в. максимального давления в цилиндре при работе на этаноле и РМ достигается позднее на 2–5 градусов в зависимости от нагрузочного режима. Смещение угла максимального давления на максимальных нагрузках не приводит к снижению эффективности подвода тепла, напротив, это позволяет повысить эффективный КПД дизеля за счет снижения части тепла, подводимой до ВМТ, за счет уменьшения продолжительности интенсивного сгорания.

Рост максимального давления и максимальной осредненной температуры газов в цилиндре с увеличением нагрузки связан с повышением цикловой подачи этанола, почти полностью сгорающего в пламени гомогенной топливовоздушной смеси.

ВЫВОДЫ

Достигнуто полное замещение нефтяного дизельного топлива – альтернативными без внесения существенных изменений в конструкцию тракторного дизеля, улучшение его экологических характеристик при сохранении мощностных показателей на уровне серийного дизеля.

Доказано, что в исследуемом тракторном дизеле при работе на этиловом спирте и рапсовом масле необходимо руководствуясь эффективными показателями устанавливать подачу запального топлива $q_3 = 13$ мг/цикл. С уменьшением величины запальной порции растет температура ОГ, удельный эффективный и суммарный расход топлива, ухудшается процесс сгорания. При увеличении запальной порции ухудшаются экологические показатели тракторного дизеля, растет дымность ОГ.

По экспериментальным исследованиям определены оптимальные установочные углы опережения впрыскивания топлива при работе тракторного дизеля на этаноле и рапсовом масле составляющие: для этанола $\Theta_{\text{э}} = 34^\circ$, для рапсового масла $\Theta_{\text{РМ}} = 34^\circ$. При этом при работе на номинальном режиме минимальный суммарный удельный эффективный расход топлива составляет $g_{e\Sigma} = 368$ г/(кВт·ч).

Экспериментально определено, что при работе на номинальном режиме на дизельном топливе, этаноле и РМ значения максимального давления газов $p_{z\text{max}}$ в цилиндре дизеля практически одинаковы, при этом процесс сгорания при работе дизеля на этаноле и РМ несколько сдвигается вправо за линию ВМТ и максимальное

давление цикла $p_{z\text{max}}$ достигается при значении угла $\varphi = 11,5^\circ$ п.к.в. после ВМТ, в то время как при работе на ДТ давление $p_{z\text{max}}$ достигается при $\varphi = 6,5^\circ$ п.к.в. после ВМТ, что свидетельствует о том, что процесс сгорания на альтернативных топливах происходит, в большей части, в увеличивающемся объеме цилиндра. При этом происходит смещение максимума эффективного КПД в сторону высоких нагрузочных режимов работы.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. В.А. Лиханов — научное руководство, анализ и доработка текста, утверждение финальной версии; О.П. Лопатин — формирование структуры статьи, анализ литературных данных, редактирование текста, создание изображений, составление выводов и заключения. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

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

ADDITIONAL INFORMATION

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gowrishankar S., Krishnasamy A. A relative assessment of emulsification and water injection methods to mitigate higher oxides of nitrogen emissions from biodiesel fueled light-duty diesel engine // *Fuel*. 2022. Vol. 308. P. 121926. doi: 10.1016/j.fuel.2021.121926
2. Attia A.M.A., Nour M., El-Seesy A.I., et al. The influence of castor biodiesel blending ratio on engine performance

including the determined diesel particulate matters composition // *Energy*. 2022. Vol. 239. P. 121951. doi: 10.1016/j.energy.2021.121951

3. Wu G., Ge J.C., Choi N.J. Effect of ethanol additives on combustion and emissions of a diesel engine fueled by palm oil biodiesel at idling speed // *Energies*. 2021. Vol. 14, N 5. P. 14051428. doi: 10.3390/en14051428

4. Hosseinzadeh-Bandbafha H., Rafiee S., Mohammadi P., et al. Exergetic, economic, and environmental life cycle assessment analyses of a heavy-duty tractor diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 241. P. 114300. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114300
5. Ayhan V., Cesur İ., Çangal Ç., et al. Combined influence of supercharging, egr, biodiesel and ethanol on emissions of a diesel engine: proposal of an optimization strategy // *Energy*. 2020. Vol. 207. P. 118298. doi: 10.1016/j.energy.2020.118298
6. Yesilyurt M.K. A detailed investigation on the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a diesel engine running on the blend of diesel fuel, biodiesel and 1-heptanol

- (C7 Alcohol) as a next-generation higher alcohol // *Fuel*. 2020. Vol. 275. P. 117893. doi: 10.1016/j.fuel.2020.117893
7. Лиханов В.А., Козлов А.Н. Моделирование сажевыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на альтернативных топливах. Киров: Вятский ГАТУ, 2019.
8. Лиханов В.А., Арасланов М.И. Исследование показателей рабочего процесса быстроходного дизеля при работе на этаноле и рапсовом масле. Киров: Вятский ГАТУ, 2021.
9. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Тепловыделение в тракторных дизелях, работающих на биотопливе // *Тракторы и сельхозмашины*. 2019. Т. 86, № 2. С. 3–9. doi: 10.31992/0321-4443-2019-2-3-9

REFERENCES

1. Gowrishankar S, Krishnasamy A. A relative assessment of emulsification and water injection methods to mitigate higher oxides of nitrogen emissions from biodiesel fueled light-duty diesel engine. *Fuel*. 2022;308:121926. doi: 10.1016/j.fuel.2021.121926
2. Attia AMA, Nour M, El-Seesy AI, et al. The influence of castor biodiesel blending ratio on engine performance including the determined diesel particulate matters composition. *Energy*. 2022;239:121951. doi: 10.1016/j.energy.2021.121951
3. Wu G, Ge JC, Choi NJ. Effect of ethanol additives on combustion and emissions of a diesel engine fueled by palm oil biodiesel at idling speed. *Energies*. 2021;14(5):14051428. doi: 10.3390/en14051428
4. Hosseinzadeh-Bandbafha H, Rafiee S, Mohammadi P, et al. Exergetic, economic, and environmental life cycle assessment analyses of a heavy-duty tractor diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends. *Energy Conversion and Management*. 2021;241:114300. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114300
5. Ayhan V, Cesur İ, Çangal Ç, et al. Combined influence of supercharging, egr, biodiesel and ethanol on emissions of a diesel engine: proposal of an optimization strategy. *Energy*. 2020;207:118298. doi: 10.1016/j.energy.2020.118298
6. Yesilyurt MK. A detailed investigation on the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a diesel engine running on the blend of diesel fuel, biodiesel and 1-heptanol (C7 Alcohol) as a next-generation higher alcohol. *Fuel*. 2020;275:117893. doi: 10.1016/j.fuel.2020.117893
7. Likhanov VA, Kozlov AN. *Modeling of soot emission in the cylinder of a diesel engine 2Ch 10.5/12.0 when operating on alternative fuels*. Киров: Vyatskiy GATU; 2019.
8. Likhanov VA, Araslanov MI. *Investigation of the indicators of the working process of a high-speed diesel engine when operating on ethanol and rapeseed oil*. Киров: Vyatskiy GATU; 2021.
9. Lihanov VA, Lopatin OP. Heat generation in biofuel tractor diesel engines. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2019;86(2):3–9. doi: 10.31992/0321-4443-2019-2-3-9

ОБ АВТОРАХ

* Лопатин Олег Петрович,

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

Лиханов Виталий Анатольевич,

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

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* Oleg P. Lopatin,

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

Vitaly A. Likhanov,

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

* Corresponding author