

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ В ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЯХ, РАБОТАЮЩИХ НА БИОТОПЛИВЕ

HEAT GENERATION IN BIOFUEL TRACTOR DIESEL ENGINES

В.А. ЛИХАНОВ, д.т.н.
О.П. ЛОПАТИН, к.т.н.

Вятская государственная сельскохозяйственная
академия, Киров, Россия, nirs_vsaa@mail.ru

V.A. LIHANOV, DSc in Engineering
O.P. LOPATIN, PhD in Engineering

Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia,
nirs_vsaa@mail.ru

В то время как для сохранения природных ресурсов применяются законодательные ограничения в отношении использования ископаемых видов топлива, все большее внимание привлекают в качестве перспективных альтернативных устойчивых источников энергии для тракторов и сельхозмашин смесевые спиртовые топлива, растительные масла и их эфиры. В работе обоснована необходимость применения биотоплива в тракторных дизелях. Показано, что выбор для дизеля альтернативного биотоплива, имеющего перспективу, должен проводиться в соответствии с конструктивными особенностями двигателя и в ходе первичных его испытаний. В работе исследованы такие экологичные источники энергии, как метанол, этанол и метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ). Метанол, этанол и МЭРМ потенциально приводят к некоторым решениям экологических проблем, так как для их производства существуют достаточно обильные ресурсы и эти источники энергии характеризуются относительно низкими выбросами вредных веществ при горении. Рассмотрены пути производства биоэтанола из различных сырьевых материалов и процесс метанолиза рапсового масла. Показано, что сельскохозяйственные предприятия, потребляющие в качестве топлива главным образом нефтепродукты, в настоящее время вполне способны производить, хотя бы для своих тракторов, экологически чистое возобновляемое биотопливо. Проведены экспериментальные исследования тракторных дизелей на биотопливах следующих составов: спирто-топливная эмульсия (СТЭ, спирт (метанол, этанол) – 25 %, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид C-5A – 0,5 %, вода – 7,0 %, дизельное топливо – 67,5 %); метанол (88,0 %) и МЭРМ (12,0 %). На основании проведенных исследований показателей тепловыделения тракторных дизелей, работающих на биотопливе, установлены зависимости влияния их режимов работы на характеристики теплоуделения и определены их числовые значения.

Ключевые слова: дизель, биотопливо, этанол, метанол, эмульсия, метиловый эфир, рапсовое масло, теплоуделение.

While legal restrictions on the use of fossil fuels are being applied to conserve natural resources, mixed spirit fuels, vegetable oils and their esters are attracting increasing attention as promising alternative sustainable energy sources for tractors and agricultural machinery. The paper substantiates the need for the use of biofuels in tractor diesel engines. It is shown that the choice for diesel alternative biofuel with a perspective should be carried out in accordance with the design features of the engine and during its primary tests. In the paper we investigate such environmentally friendly energy sources such as methanol, ethanol and methyl ester of rapeseed oil (MERO). Methanol, ethanol and MERO have the potential to lead to some solutions to environmental problems, as there are abundant resources for their production and these sources of energy are characterized by relatively low emissions of harmful substances during combustion. The ways of bioethanol production from various raw materials and the process of rapeseed oil methanolysis are considered. It is shown that agricultural enterprises that consume mainly petroleum products as fuel are now quite capable of producing at least environmentally friendly renewable biofuels for their tractors. Experimental studies of tractor diesel engines on biofuels of the following compositions were carried out: alcohol-fuel emulsion (AFE, alcohol (methanol, ethanol) – 25 %, detergent-dispersing additive succinimide C-5A – 0,5 %, water – 7,0 %, diesel fuel – 67,5 %); methanol (88,0 %) and MERO (12,0 %). Based on the studies of the thermal performance of tractor diesel engines running on biofuel, the nature of the influence of their work on the characteristics of heat dissipation and defined their numeric values.

Keywords: diesel, biofuel, ethanol, methanol, emulsion, methyl ether, rapeseed oil, heat dissipation.

Введение

В то время как для сохранения природных ресурсов применяются законодательные ограничения в отношении использования ископаемых видов топлива, все большее внимание привлекают в качестве перспективных альтернативных устойчивых источников энергии для тракторов и сельхозмашин смесевые спиртовые топлива, растительные масла и их эфиры [1].

Метанол (CH_3OH) рассматривается как один из оптимальных видов топлива для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) считается одним из важнейших компонентов биотоплива и перспективным альтернативным топливом в ДВС. Поскольку цены на нефть растут вместе с накоплением выбросов парниковых газов и жесткими законодательными нормами в области охраны окружающей среды, то для решения этих проблем необходимо использовать новые возобновляемые и экологически чистые виды топлива. Использование метанола и этанола потенциально может привести к некоторым решениям этих проблем, так как для их производства существуют достаточно обильные ресурсы и эти спирты характеризуются относительно низкими выбросами вредных веществ при горении [2].

В настоящее время существует достаточно способов получения спиртов в качестве альтернативного топлива из различных исходных

материалов (биомасса, природный газ, коксовый газ, углекислый газ и др.). Этанол в основном производится путем ферментации из двух исходных материалов, которые представляют собой сырье на основе крахмала, включая кукурузу, зерна ячменя, зернового сорго, сахарное сырье, фрукты, сахарный тростник, цитрусовую патоку, тростниковый сорго, сахарную свеклу. Кроме того, существуют способы для производства этанола из целлюлозных материалов, таких как древесные или бумажные отходы. Помимо этих исходных материалов этанол получают путем гидратации этилена [3].

Этанол может быть получен путем прямой ферментации сахаров с дрожжами, из лигноцеллюлозных материалов и каталитической гидратации этилена (рис. 1).

Процессы, необходимые для производства биоэтанола из различных сырьевых материалов, приведены в таблице 1.

Метанол – самый простой спирт и известен как древесный спирт. Древесные спирты приобрели свое название из-за способа получения путем пиролиза древесины. В настоящее время метанол широко используется в качестве товарного химиката. Он непосредственно используется и представляет собой сырье для производства многих спиртов, жидкого топлива, химикатов и пластмасс, но в основном используется при

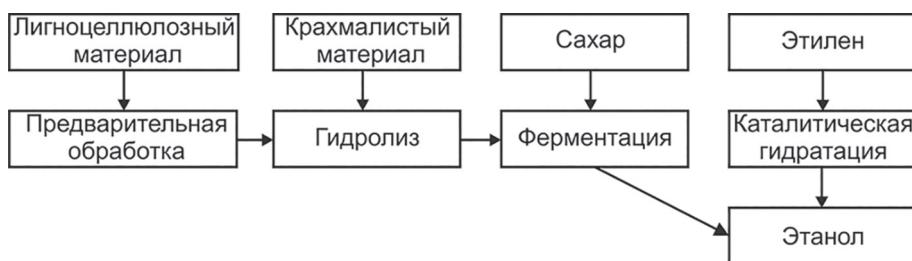


Рис. 1. Способы получения этанола

Таблица 1

Пути производства биоэтанола из различных сырьевых материалов

Сырье	Обработка
Дерево	Кислотный гидролиз + ферментация
Дерево	Ферментативный гидролиз + ферментация
Солома	Кислотный гидролиз + ферментация
Солома	Ферментативный гидролиз + ферментация
пшеница	Солодка + ферментация
Карамельная тросточка	Ферментация
Сахарная свекла	Ферментация
Зерно кукурузы	Ферментация
Кукурузный стебель	Кислотный гидролиз + ферментация
Сладкий сорго	Ферментация

производстве других химических веществ. Метanol можно получать из возобновляемых и невозобновляемых ископаемых видов топлива, включая природный газ, уголь, биомассу, углекислый газ, находящийся в атмосфере либо в промышленных источниках, таких как дымовые газы, выделяемые на промышленных предприятиях в результате сжигания ископаемых видов топлива. Благодаря основному источнику углеродных атомов в своей структуре – углероду – помимо этих методов метанол также может быть получен и из отходов. Эффективность синтеза метанола из различных материалов отличается, но наиболее доступным поставщиком углекислого газа для синтеза метанола является природный газ. При этом эффективность его синтеза составляет более 70 % [4, 5].

Самая большая разница между дизельным топливом и такими спиртами, как метанол и этанол, – это уровень кислорода. Дизельное топливо не имеет атомов кислорода, тогда как метанол имеет 10 %, а этанол – 50 % содержания кислорода по массе. Поэтому для снижения токсичности отработавших газов метанол и этанол могут применяться в тракторных дизелях без каких-либо изменений в смесях биотоплива с дизельным топливом [4].

Из всех существующих альтернативных видов топлива достаточно перспективными являются биотоплива и их смеси с дизельным топливом в разных пропорциях (растительно-минеральные смеси). Сельскохозяйственные предприятия, потребляющие в качестве топлива главным образом нефтепродукты, в настоящее время вполне способны производить хотя

бы для своих тракторов экологически чистое возобновляемое биотопливо [5].

Растительное масло любого вида – это смесь триглицеридов, т.е. эфиров, соединенных с молекулой глицерина. Глицерин, в свою очередь, придает вязкость и плотность растительному маслу. Таким образом, основной задачей при получении биотоплива является удаление глицерина путем замещения его на спирт. На данный момент альтернативные виды топлива из рапсового масла находят применение в натуральном виде, в виде метилового и диметилового эфиров рапсового масла [6].

На рис. 2 представлен процесс метанолиза рапсового масла. Процесс производства МЭРМ из масла заключается в предварительном очищении рапсового масла с последующим добавлением метилового спирта. Катализатором для данной реакции служит щелочь. Далее смесь нагревают до 50 °C, отстаивают и охлаждают. Жидкость расслаивается на две фракции – легкую и тяжелую. Легкая представляет собой метиловый эфир (биотопливо), а тяжелая – глицерин [7].

Разумеется, выбор для тракторного дизеля альтернативного биотоплива, имеющего перспективу, будь то топливо на основе спирта, эфира или растительного масла, либо какого-то иного нового топлива, должен проводиться в соответствии с конструктивными особенностями двигателя и в ходе первичных его испытаний.

Цель исследования

Анализ зависимости показателей тепловыделения тракторных дизелей, работающих на биотопливе, от их режимов работы.

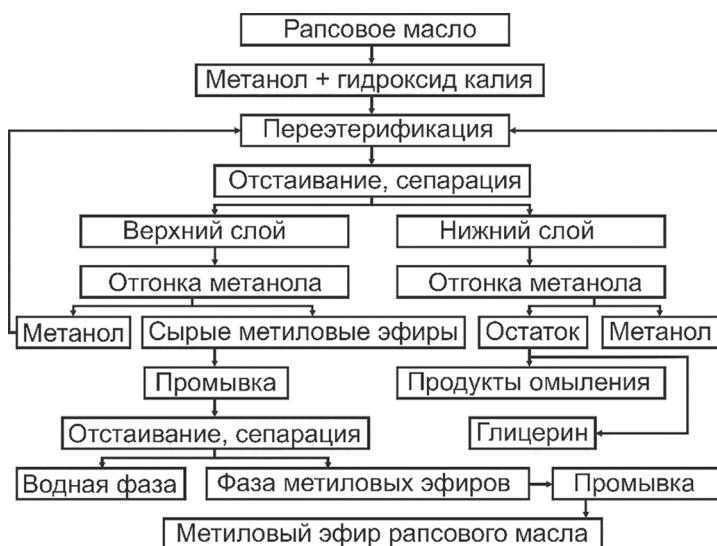


Рис. 2. Процесс метанолиза рапсового масла [7]

Методы и средства проведения исследований

В Вятской государственной сельскохозяйственной академии на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены экспериментальные исследования тракторных дизелей на биотопливах следующих составов: СТЭ (спирт (метанол, этанол) – 25 %, моюще-диспергирующая присадка сукцинид С-5А – 0,5 %, вода – 7,0 %, дизельное топливо – 67,5 %); метанол (88,0 %) и МЭРМ (12,0 %) [8, 9].

На рис. 3 и 4 представлена динамика теплоизделия тракторных дизелей, работающих на биотопливе, в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала (ПКВ).

В подрисуночных подписях приняты следующие условные обозначения:

$\Theta_{\text{впр}}$ – угол опережения впрыскивания топлива, град;

n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹;

p_e – среднее эффективное давление, МПа.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования дизеля на метаноло-топливной эмульсии (МТЭ) показывают (рис. 3), что максимальная температура цикла (T_{\max}) составляет 2430 К при угле ПКВ $\phi = 14,0^\circ$ после ВМТ. В момент же открытия выпускного клапана температура составляет 1000 К, что ниже

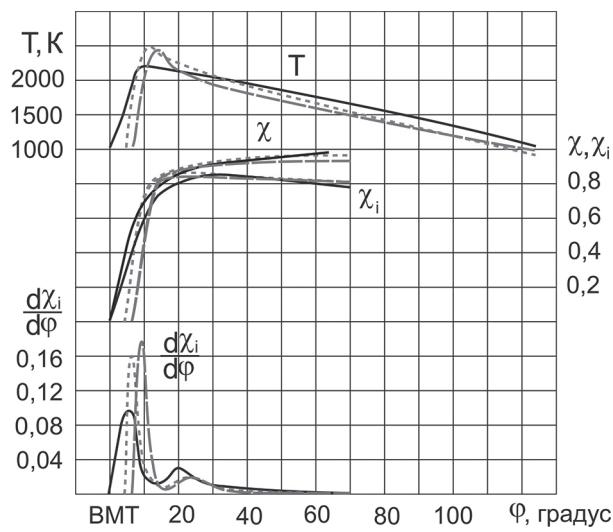


Рис. 3. Характеристики тепловыделения тракторного дизеля 4Ч11,0/12,5 в зависимости от изменения угла ПКВ ($\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$):

— дизельное топливо; - - - ЭТЭ;
— МТЭ

в 2,4 раза величины T_{\max} . Исследования дизеля на этаноло-топливной эмульсии (ЭТЭ) характеризуются величиной T_{\max} , составляющей 2510 К при угле ПКВ $\phi = 12,0^\circ$ после ВМТ. В момент же открытия выпускного клапана температура равняется 900 К, что ниже в 2,8 раза ее максимального значения.

Применение СТЭ приводит к увеличению скорости активного тепловыделения ($d\chi/d\phi$) и сдвигает максимум скорости вправо от ВМТ. Так, у дизеля, работающего на МТЭ, максимальная величина $d\chi/d\phi$ составляет 0,180 при угле ПКВ $\phi = 9,0^\circ$ после ВМТ, что на 89,5 % выше дизельного процесса. Максимальное значение скорости активного тепловыделения при работе дизеля на ЭТЭ составляет 0,160 при угле ПКВ $\phi = 6,5^\circ$ после ВМТ, что на 68,4 % выше дизельного процесса. Также необходимо отметить, что наличие второго максимума на кривых скорости активного выделения тепла $d\chi/d\phi$, как по дизельному процессу, так и на СТЭ, характеризуется величиной дополнительной турбулизации топливово-воздушной смеси в камере сгорания дизеля, возникающей вследствие засасывания рабочего заряда из камеры сгорания в надпоршневое пространство в процессе расширения.

Из графиков (рис. 4) видно, что в результате применения метанола и МЭРМ несколько изменяется характер кривой скорости тепло-

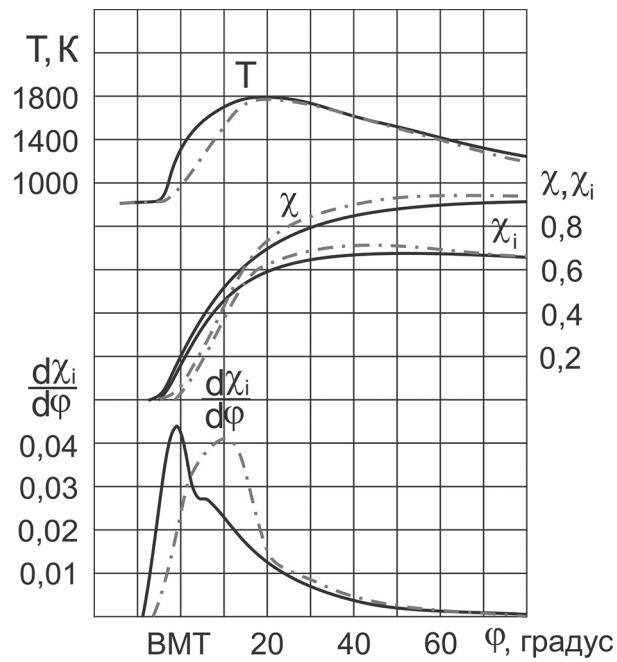


Рис. 4. Характеристики тепловыделения тракторного дизеля 2Ч10,5/12,0 в зависимости от изменения угла ПКВ ($n = 1800 \text{ мин}^{-1}$):

— дизельное топливо ($\Theta_{\text{впр}} = 30^\circ$);
- - - - метанол и МЭРМ ($\Theta_{\text{впр}} = 34^\circ$)

выделения и осредненной температуры газов в цилиндре, следовательно можно говорить об изменении показателей процесса. Рассматривая особенности процесса тепловыделения в дизеле при работе на метаноле и МЭРМ, можно заметить характерное смещение максимума скорости тепловыделения вправо от ВМТ, что говорит об активизации тепловыделения во второй фазе процесса сгорания. Так, на номинальном режиме пик скорости тепловыделения при работе на дизельном топливе достигается за $1,0^\circ$ до ВМТ, а на метаноле и МЭРМ смещается вправо и достигается уже при угле, равном 10° после ВМТ. Также наблюдается некоторое снижение максимума скорости тепловыделения с 0,044 при работе на дизельном топливе до 0,041 при работе на метаноле с МЭРМ.

Представленные кривые тепловыделения наглядно доказывают, что применение метанола и МЭРМ не приводит к ухудшению полностью сгорания, поскольку максимальное значение полного тепловыделения (χ) соответствует значениям дизельного процесса, а максимальная величина активного тепловыделения (χ_i) при работе на метаноле и МЭРМ их превышает.

На рис. 5 и 6 представлены характеристики тепловыделения тракторных дизелей, работающих на биотопливе, на различных нагрузочных режимах.

Применение СТЭ (рис. 5) вызывает рост угла, соответствующего максимальной температуре цикла ($\Phi_{T\max}$), но на малых нагрузках этот рост является более значительным. Так,

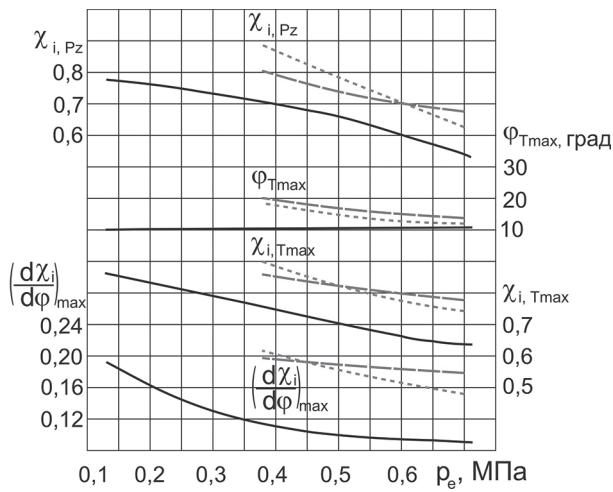


Рис. 5. Характеристики тепловыделения тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки ($\Theta_{впр} = 23^\circ$, $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$):
 — дизельное топливо; - - - ЭТЭ;
 - - - МТЭ

применение ЭТЭ при максимальном значении эффективного давления $p_c = 0,70 \text{ МПа}$ приводит к значению $\Phi_{T\max} = 12,5^\circ$ ПКВ после ВМТ, а при снижении нагрузки до $p_c = 0,38 \text{ МПа}$ $\Phi_{T\max}$ повышается уже до $20,0^\circ$ ПКВ после ВМТ, что, в свою очередь, выше дизельного процесса в пределах от 19,1 % до 2,0 раз, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки.

В результате применения СТЭ с увеличением нагрузки происходит снижение максимальных значений скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$, активного тепловыделения при максимальном давлении ($\chi_{i, Pz}$), и активного тепловыделения при максимальной температуре ($\chi_{i, T\max}$). Так, например, при $p_c = 0,38 \text{ МПа}$ при работе на ЭТЭ значение $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ составляет 0,208, что на 85,7 % выше дизельного процесса.

Исходя из полученных кривых (рис. 6), можно отметить, что при работе на метаноле и МЭРМ величина $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ при малых и средних нагрузках существенно ниже дизельного процесса, а с увеличением нагрузки до максимальной – стремительно возрастает, превышая значения дизельного процесса. Так, при работе на метаноле и МЭРМ при минимальной нагрузке $(d\chi_i/d\phi)_{\max} = 0,03$, что на 45,5 % ниже дизельного процесса, при $p_c = 0,59 \text{ МПа}$ величина $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ возрастает до 0,049, что уже выше дизельного процесса на 8,9 %. Похожим образом ведут себя и кривые $\chi_{i, Pz\max}$. Причиной являются соответствующие значения угла $\Phi_{T\max}$, что

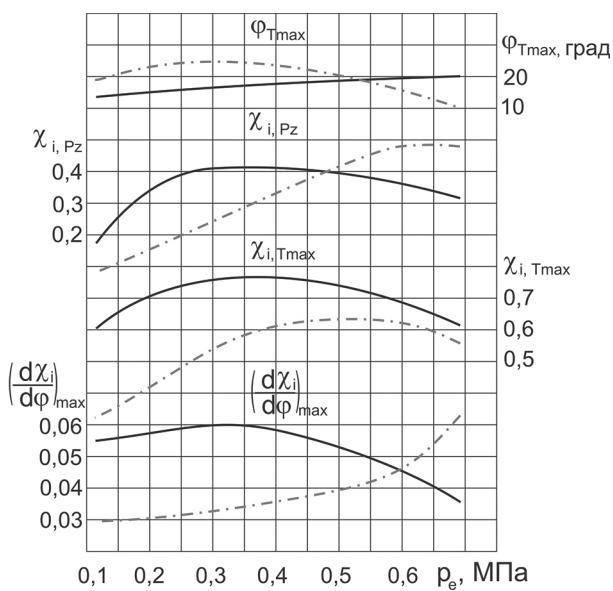


Рис. 6. Характеристики тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения нагрузки ($n = 1800 \text{ мин}^{-1}$):
 — дизельное топливо ($\Theta_{впр} = 30^\circ$);
 - - - метанол и МЭРМ ($\Theta_{впр} = 34^\circ$)

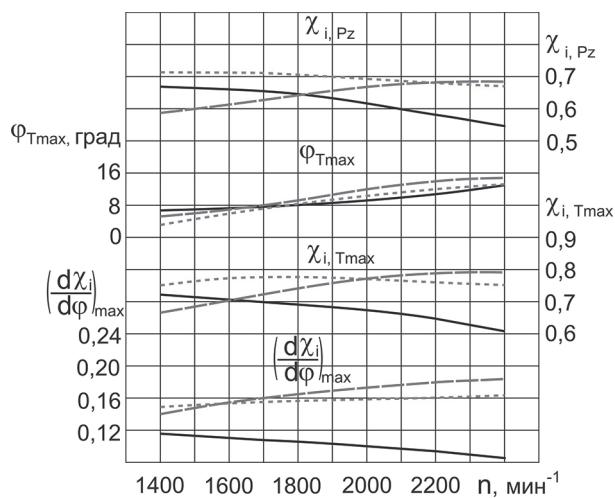


Рис. 7. Характеристики тепловыделения тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения ($\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$):
 — дизельное топливо; - - - - ЭТЭ;
 — МТЭ

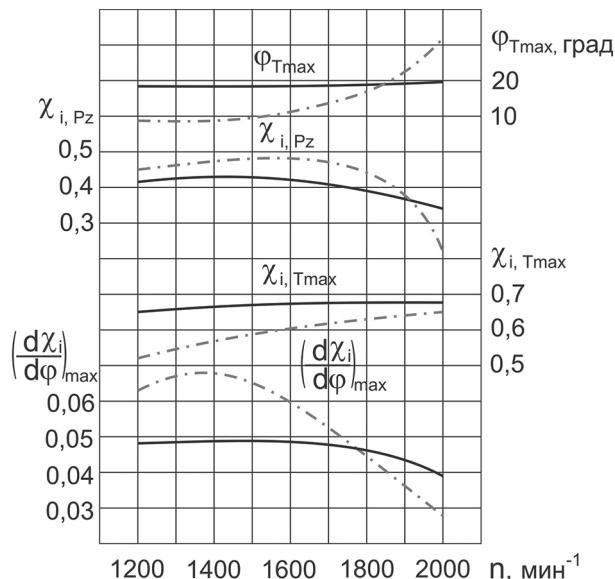


Рис. 8. Характеристики тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения частоты вращения:
 — дизельное топливо ($\Theta_{\text{впр}} = 30^\circ$);
 - - - - метанол и МЭРМ ($\Theta_{\text{впр}} = 34^\circ$)

приводит к некоторому смещению процесса сгорания при работе на метаноле и МЭРМ на линию расширения.

На рис. 7 и 8 представлены характеристики тепловыделения тракторных дизелей, работающих на биотопливе, на различных скоростных режимах работы.

Анализируя рис. 7, следует отметить, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала растут значения угла при максимальной температуре цикла $\Phi_{T\max}$ как при дизельном процессе, так и при работе на СТЭ. Однако применение СТЭ вызывает отличительный от дизельного процесса характер протекания кривых скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$. Это обусловлено низкими значениями цетанового числа применяемых спиртов, что естественно увеличивает ПЗВ. Но необходимо отметить, что в то же время этанол и метанол обладают высокими октановыми числами, что не может не скажаться на скорости горения и тепловыделения.

Рассматривая представленные на рис. 8 графики тепловыделения, необходимо отметить, что при работе двигателя на метаноле и МЭРМ на малых и средних скоростных режимах происходит увеличение максимальной скорости тепловыделения по отношению к дизельному процессу. При этом величина $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ достигает 0,069 ($n = 1400$ мин $^{-1}$). Однако с ростом частоты вращения коленчатого вала отводится меньше времени на смесеобразование, что снижает скорость сгорания, и величина $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ уже составляет 0,03 ($n = 2000$ мин $^{-1}$), что уже несколько ниже дизельного процесса.

Выходы

На основании проведенных исследований показателей тепловыделения тракторных дизелей, работающих на биотопливе, установлены зависимости влияния их режимов работы на характеристики тепловыделения и определены их числовые значения, приведенные в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Результаты исследований характеристик тепловыделения тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 ($\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, $n = 2200$ мин $^{-1}$, $p_e = 0,64$ МПа)

Топливо	Показатели			
	$\chi_{i,Pz}$	$\chi_{i,T\max}$	$(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$	$\Phi_{T\max}$, градус
Дизельное	0,58	0,64	0,095	10,5
МТЭ	0,69 (увеличение на 19,0 %)	0,79 (увеличение на 23,4 %)	0,180 (увеличение на 89,5 %)	14,0 (увеличение на 3,3 %)
ЭТЭ	0,68 (увеличение на 17,2 %)	0,76 (увеличение на 18,8 %)	0,160 (увеличение на 68,4 %)	12,0 (увеличение на 14,3 %)

Таблица 3

Результаты исследований характеристик тепловыделения тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0
 $(\Theta_{\text{впр}} = 34^\circ, n = 1800 \text{ мин}^{-1}, p_e = 0,59 \text{ МПа})$

Топливо	Показатели			
	$\chi_{i, Pz}$	$\chi_{i, T_{\max}}$	$(d\chi_i/d\phi)_{\max}$	$\Phi_{T_{\max}}$, градус
Дизельное	0,38	0,59	0,044	20,0
Метанол и МЭРМ	0,48 (увеличение на 26,3 %)	0,62 (увеличение на 5,1 %)	0,041 (снижение на 6,8 %)	17,5 (снижение на 12,5 %)

Литература

1. Rajesh Kumar B., Saravanan S. Use of Higher Alcohol Biofuels in Diesel Engines: a Review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 60. P. 84–115.
2. A Semi-detailed chemical Kinetic Mechanism of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) and Diesel blend for Combustion Simulations / S. Zhang, W. Wu, C.-F. Lee [et al.] // SAE International Journal of Engines. 2016. Vol. 9. № 1. P. 631–640.
3. Datta A., Mandal B.K. Impact of Alcohol Addition to Diesel on the Performance Combustion and Emissions of a Compression Ignition Engine // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 98. P. 670–682.
4. Experimental Study on Evaporation Characteristics of Ethanol-Diesel blend Fuel Droplet / K. Han, B. Yang, C. Zhao [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. Vol. 70. P. 381–388.
5. Aydin F., O gut H. Effects of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel in Single Cylinder Diesel Engine to engine Performance and Emissions // Renewable Energy. 2017. V. 103. P. 688–694.
6. Копчиков В.Н., Фоминых А.В. Влияние применения метанола и метилового эфира рапсового масла на содержание оксидов азота в отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения установочных углов // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 1. С. 107–110.
7. Лиханов В.А., Копчиков В.Н., Фоминых А.В. Применение метанола и метилового эфира рапсового масла для работы дизеля 2Ч 10,5/12,0. Киров: Вятская ГСХА, 2017. 226 с.
8. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Investigation of the speed regime of tractor diesel engine running on natural gas with recirculation // VII International Conference «Modern Technologies for Non-Destructive Testing». IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 457 (2018) 012011. DOI:10.1088/1757-899X/457/1/012011.
9. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Улучшение экологических показателей дизельных двигателей применением биотоплива // Двигателестроение. 2018. № 4 (274). С. 13–17.

References

1. Rajesh Kumar B., Saravanan S. Use of Higher Alcohol Biofuels in Diesel Engines: a Review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 60. P. 84–115.
2. A Semi-detailed chemical Kinetic Mechanism of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) and Diesel blend for Combustion Simulations / S. Zhang, W. Wu, C.-F. Lee [et al.] // SAE International Journal of Engines. 2016. Vol. 9. № 1. P. 631–640.
3. Datta A., Mandal B.K. Impact of Alcohol Addition to Diesel on the Performance Combustion and Emissions of a Compression Ignition Engine // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 98. P. 670–682.
4. Experimental Study on Evaporation Characteristics of Ethanol-Diesel blend Fuel Droplet / K. Han, B. Yang, C. Zhao [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. Vol. 70. P. 381–388.
5. Aydin F., O gut H. Effects of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel in Single Cylinder Diesel Engine to engine Performance and Emissions // Renewable Energy. 2017. V. 103. P. 688–694.
6. Kopchikov V.N., Fominyh A.V. The effect of the use of methanol and methyl ether of rapeseed oil on the content of nitrogen oxides in the exhaust gases of a diesel engine 2Ch 10,5/12,0 depending on changes in installation angles. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya. 2015. No 1, pp. 107–110 (in Russ.).
7. Likhanov V.A., Kopchikov V.N., Fominykh A.V. Primeneniye metanola i metilovogo efira rapsovogo masla dlya raboty dizelya 2Ch 10,5/12,0 [The use of methanol and methyl ether of rapeseed oil for operation of diesel engine 2Ch 10,5/12,0]. Kirov: Vyatskaya GSKhA Publ., 2017. 226 p.
8. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Investigation of the speed regime of tractor diesel engine running on natural gas with recirculation // VII International Conference «Modern Technologies for Non-Destructive Testing». IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 457 (2018) 012011. DOI:10.1088/1757-899X/457/1/012011.
9. Lihannov V.A., Lopatin O.P. Improving the environmental performance of diesel engines using biofuels. Dvigatelestroenie. 2018. No 4 (274), pp. 13–17 (in Russ.).