

## **Сгорание и тепловыделение в цилиндре тракторного дизеля при работе на метанола-топливной эмульсии**

## **Combustion and heat emission in the cylinder of tractor diesel engine operating on methanol-fuel emulsion**

**В. А. ЛИХАНОВ<sup>1</sup>**, д-р техн. наук  
**О. П. ЛОПАТИН<sup>1</sup>**, канд. техн. наук  
**С. А. РОМАНОВ<sup>1</sup>**, канд. техн. наук  
**А. В. ПАТУРОВ<sup>2</sup>**, инж.

<sup>1</sup> Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Киров, Россия, nirs\_vsaa@mail.ru

<sup>2</sup> Кировский институт повышения квалификации работников Федеральной службы исполнения наказаний России, Киров, Россия, pavkirov@bk.ru

**V. A. LIKHANOV<sup>1</sup>**, DSc in Engineering  
**O. P. LOPATIN<sup>1</sup>**, PhD in Engineering  
**S. A. ROMANOV<sup>1</sup>**, PhD in Engineering  
**A. V. PATUROV<sup>2</sup>**, Engineer

<sup>1</sup> Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia, nirs\_vsaa@mail.ru

<sup>2</sup> Kirov Institute of Advanced Training of the Russian Federal Penitentiary Service, Kirov, Russia, pavkirov@bk.ru

Статья посвящена вопросам применения метанола-топливной эмульсии в качестве альтернативного моторного топлива в тракторном дизеле 4Ч 11,0/12,5. Установлена максимальная концентрация метанола в составе эмульсии, которая не должна превышать 25 % исходя из условия отсутствия неустойчивой работы дизеля и пропусков воспламенения в цилиндре. По результатам исследований стабильности и первичных испытаний на двигателе принят оптимальный состав метанола-топливной эмульсии для тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5: 25 % метанола, 0,5 % сукцинимиды С-5А, 7 % воды, 67,5 % дизельного топлива. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния метанола-топливной эмульсии на показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения дизеля 4Ч 11,0/12,5. С целью определения и оптимизации основных параметров работы дизеля при применении метанола-топливной эмульсии проведены стендовые испытания, которые включали весь комплекс регулировочных, нагрузочных и скоростных характеристик. Определены значения показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения на номинальном режиме работы дизеля: максимальная температура цикла повышается на 16,2 % и составляет 2580 К; максимальное давление повышается на 0,4 % и составляет 8,54 МПа; жесткость процесса сгорания повышается на 74,5 % и составляет 1,251 МПа/град.;

угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, увеличивается на 36,4 % и составляет 30 градусов поворота коленчатого вала; скорость тепловыделения возрастает в 2 раза и составляет 0,177; значение тепловыделения при максимальной температуре увеличивается на 12,6 % и составляет 0,789; значение тепловыделения при максимальном давлении увеличивается на 14,7 % и составляет 0,688.

**Ключевые слова:** дизель; метано-топливная эмульсия; сгорание; тепловыделение.

The article is devoted to the application of methanol-fuel emulsion as alternative motor fuel in the 4Ch 11.0/12.5 tractor diesel engine. The maximum concentration of methanol in the emulsion is determined; it should not exceed 25 % to prevent the uneven diesel engine operation and misfiring in the cylinder. According to the study results of stability and the primary tests of engine, the optimal composition of methanol-fuel emulsion is accepted for 4Ch 11.0/12.5 tractor diesel engine: 25 % of methanol, 0.5 % of S-5A succinimide, 7 % of water, 67.5 % of diesel fuel. The results of experimental studies of influence of methanol-fuel emulsion on the indices of combustion process and the characteristics of heat emission of the 4Ch 11.0/12.5 diesel engine are given. In order to determine and optimize the main parameters of diesel engine operation on methanol-fuel emulsion, the bench tests including the full range of regulating, loading and speed characteristics were carried out. The values of combustion process indices and heat emission characteristics of diesel engine operating under nominal mode are determined: the maximum temperature of the cycle increases by 16.2 % and equals to 2580 K; the maximum pressure increases by 0.4 % and equals to 8.54 MPa; the severity of the combustion process increases by 74.5 % and equals to 1.251 MPa/degree; the angle corresponding to the ignition delay period increases by 36.4 % and equals to 30 degrees of crank angle change; the heat emission speed increases by 2 times and equals to 0.177; the heat emission value at maximum temperature increases by 12.6 % and equals to 0.789; the heat emission value at maximum pressure increases by 14.7 % and equals to 0.688.

**Keywords:** diesel engine; methanol-fuel emulsion; combustion; heat emission.

## Введение

Постоянное ужесточение норм содержания токсичных веществ в отработавших газах (ОГ) и требований по улучшению топливной экономичности двигателей стимулирует исследования по созданию новых моторных топлив для тракторных дизелей.

Использование в тракторной технике альтернативных смесевых топлив на основе метилового спирта позволит заменить нефтяные топлива, значительно расширить сырьевую базу для получения моторных топлив, облегчит решение вопросов модернизации топливных систем тракторных дизелей. Возможность получения моторных топлив с требуемыми физико-химическими свойствами позволит целенаправленно совершенствовать рабочие процессы тракторных дизелей, улучшить показатели их топливной экономичности и токсичности ОГ.

## Цель исследования

Анализ теоретических исследований эмульсий различного состава, их физико-химических и эксплуатационных свойств подтверждает возможность использования данного вида топлива в тракторных дизелях. Эмульсии — наиболее простой, недорогой и доступный способ применения спиртов в качестве моторного топлива. Это позволяет экономить дизельное топливо (ДТ) без значительных затрат на внесение конструктивных изменений и дополнений в дизель с возможностью реализации в эксплуатируемых двигателях.

Все это дает основание полагать, что исследование рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на метано-топливной эмульсии (МТЭ), а именно изучение влияния данного топлива на показатели процесса сгорания, характеристики тепловыделения, эффективные и экологические показатели — актуальная научная задача, имеющая важное народнохозяйственное значение.

## Материалы и методы

В Вятской государственной сельскохозяйственной академии на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования по переводу тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 на МТЭ. Исследования стабильности МТЭ выполнены по методике, разработанной в НПО "Синтез ПАВ", с учетом традиционных

методик. Эмульсии приготавливались на гомогенизаторе МРВ-302 при частоте вращения вала 2000 мин<sup>-1</sup> [1].

Экспериментальная установка включала электротормозной стенд САК-N670, дизель Д-240, измерительную аппаратуру. Испытания проводились на всех нагрузочных и скоростных режимах работы дизеля с использованием летнего ДТ по ГОСТ 305—82, моторного масла М-10-Г<sub>2</sub> по ГОСТ 17479.1—85, технического метанола по ГОСТ 2222—95. Индицирование процесса сгорания в цилиндре дизеля проводилось с помощью индикатора МАИ-5А, оснащенного датчиком давления, который устанавливался в головке блока дизеля и соединялся каналом с камерой сгорания.

Обработка индикаторных диаграмм рабочего процесса дизеля при работе на ДТ и МТЭ осуществлялась с помощью ПЭВМ по программе ЦНИДИ-ЦНИИМ. Отбор и анализ проб ОГ производился с помощью автоматической системы газового анализа АСГА-Т с соблюдением требований инструкции по эксплуатации [2].

## Результаты и их обсуждение

Графики стабильности МТЭ к процессу седиментации с применением присадки сукцинимид С-5А и при добавлении в состав эмульсии воды (7 % мас.) представлены на рис. 1.

Стабильность эмульсии повышается как при увеличении концентрации присадки, так и при увеличении концентрации метанола [3]. Так, при концентрации метанола 25 % стабильность эмульсии повышается с 17,9 ч при  $K_{\text{п}} = 0,5$  % до 34,6 ч при  $K_{\text{п}} = 2$  %.

По результатам исследований стабильности и первичных испытаний на двигателе принят оптимальный состав МТЭ для тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5: 25 % метанола, 0,5 % сукцинимид С-5А, 7 % воды, 67,5 % ДТ. Дальнейшие испытания дизеля проводились на эмульсии данного состава [4].

На рис. 2, а приведены совмещенные индикаторные диаграммы при работе дизеля на ДТ и МТЭ, оптимальных установочных углах опережения впрыскивания топлива (УОВТ) и номинальной частоте вращения.

При переходе на МТЭ максимальное давление сгорания  $p_{z \text{ max}}$  возрастает с 8,51 до 8,54 МПа. Точка начала видимого сгорания при работе на ДТ лежит на линии сжатия индикаторной диаграммы при значении угла

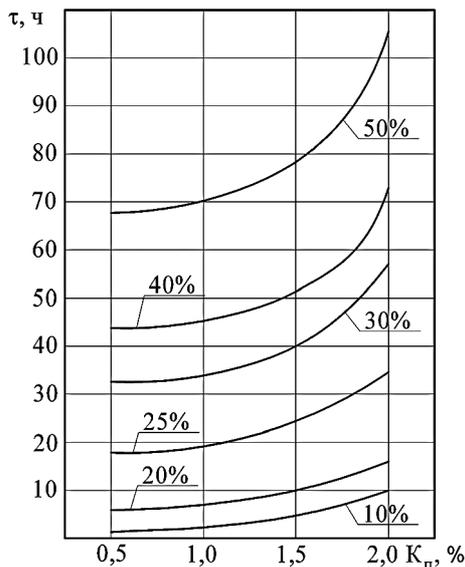


Рис. 1. Стабильность МТЭ с присадкой сукцинимид С-5А и различными концентрациями метанола:

$K_p$  — концентрация присадки; 10, 20, 30, 40, 50 % — концентрации метанола

$\varphi_c$  ДТ = 4° поворота коленчатого вала после верхней мертвой точки (ПКВ после ВМТ), а при работе на МТЭ — при  $\varphi_c$  МТЭ = 7° ПКВ после ВМТ. Процесс сгорания при работе дизеля на МТЭ сдвигается на линию расширения. При работе на ДТ значение  $p_z$  max достигается при угле  $\varphi_{z\text{ ДТ}} = 5,5^\circ$  ПКВ после ВМТ, а при работе на МТЭ при  $\varphi_{z\text{ МТЭ}} = 12,5^\circ$  ПКВ после ВМТ [5].

На рис. 2, б представлены показатели, полученные в результате обработки индикаторных диаграмм. Максимальная осредненная температура цикла  $T_{\text{max}}$  при работе дизеля на ДТ составляет 2220 К и наблюдается при угле  $\varphi_{T_{\text{max}}} = 7,5^\circ$  ПКВ после ВМТ [6]. При работе дизеля на МТЭ значение  $T_{\text{max}}$  повышается до 2580 К и достигается при угле  $\varphi_{T_{\text{max}}} = 14^\circ$  ПКВ после ВМТ.

При работе на МТЭ характерны увеличение скорости тепловыделения  $d\chi/d\varphi$  и сдвиг максимума скорости вправо от ВМТ. При работе на ДТ  $(d\chi/d\varphi)_{\text{max}} = 0,086$  наблюдается при угле  $\varphi = 0,4^\circ$  ПКВ после ВМТ, а при работе на МТЭ  $(d\chi/d\varphi)_{\text{max}} = 0,177$  достигается при угле  $\varphi = 9,5^\circ$  ПКВ после ВМТ. Кривые относительного  $\chi$  и активного  $\chi_i$  тепловыделений при работе дизеля на МТЭ быстрее достигают максимума [7].

Таким образом, тепловыделение при работе дизеля на МТЭ идет быстрее. Величина активного тепловыделения, соответствующая максимальному давлению сгорания  $p_z$  max, при работе дизеля на ДТ составляет  $\chi_i p_z \text{ max} = 0,6$ , а при работе на МТЭ  $\chi_i p_z \text{ max} = 0,69$ . Величина активного тепловыделения, соответствующая максимальной осредненной температуре  $T_{\text{max}}$ , при работе дизеля на ДТ составляет  $\chi_i T_{\text{max}} = 0,7$ , а при работе на МТЭ  $\chi_i T_{\text{max}} = 0,79$  [8].

На рис. 3, а представлены графики влияния применения МТЭ на показатели процесса сгорания при оптимальных установочных УОВТ в зависимости от изменения нагрузки на номинальной частоте вращения.

Величина  $T_{\text{max}}$  при переходе на МТЭ на малых нагрузках ( $p_e = 0,38$  МПа) повышается с 2010 до 2120 К, при нагрузке  $p_e = 0,7$  МПа она повышается с 2270 до 2600 К. Величина  $p_z$  max при переходе на МТЭ при  $p_e = 0,38$  МПа снижается с 7,7 до 5,6 МПа, при  $p_e = 0,7$  МПа она повышается с 8,7 до 8,8 МПа.

Степень повышения давления  $\lambda$  при  $p_e = 0,38$  МПа составляет 1,88 при работе дизеля на ДТ,  $\lambda = 1,83$  при ра-

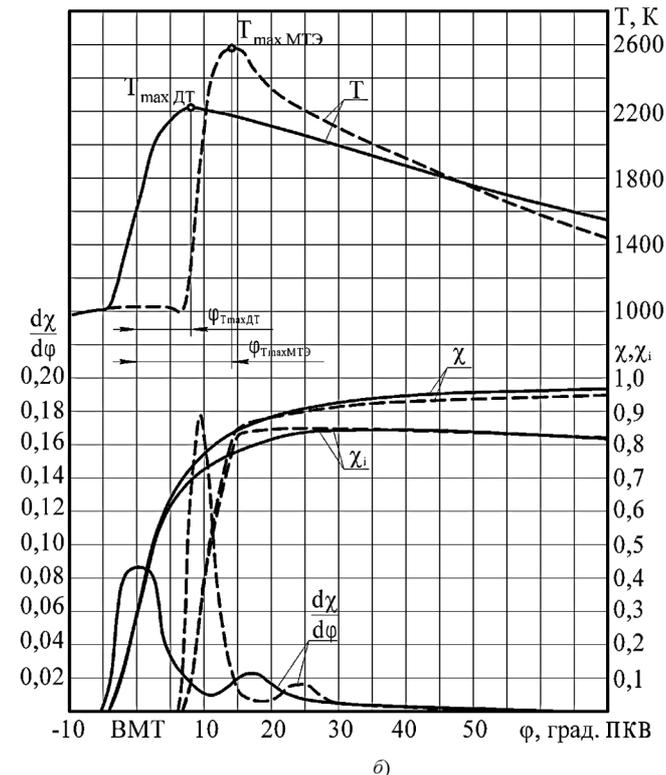
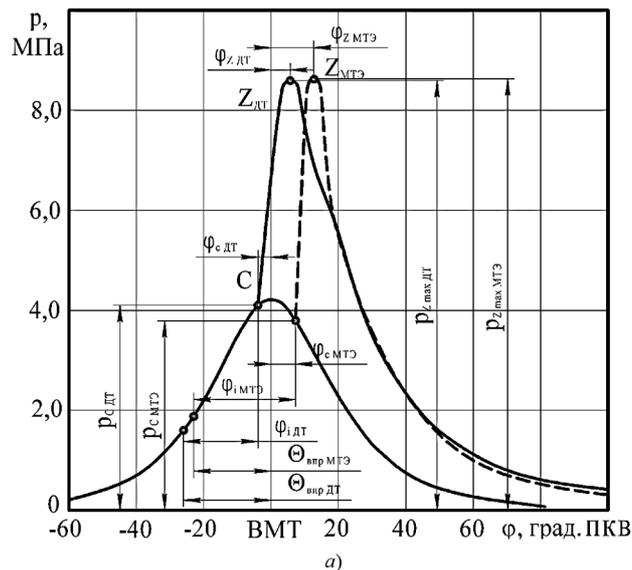


Рис. 2. Влияние применения МТЭ на индикаторные показатели (а) и характеристики тепловыделения (б) дизеля 4С 11,0/12,5 при  $\Theta_{\text{впр ДТ}} = 26^\circ$ ,  $\Theta_{\text{впр МТЭ}} = 23^\circ$ ,  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_e = 0,64$  МПа в зависимости от угла ПКВ:

— — ДТ; ---- — МТЭ

боте на МТЭ. При  $p_e = 0,7$  МПа и работе на ДТ  $\lambda = 2,15$ , а при работе на МТЭ  $\lambda = 2,33$ , т.е. в области высокой нагрузки значение  $\lambda$  увеличивается.

Значение  $(dp/d\varphi)_{\max}$  при переходе на МТЭ и  $p_e = 0,38$  МПа увеличивается с 0,63 до 0,75 МПа/град., при  $p_e = 0,7$  МПа оно увеличивается с 0,74 до 1,37 МПа/град. Значение угла  $\varphi_i$ , соответствующего периоду задержки воспламенения, при переходе на МТЭ при  $p_e = 0,38$  МПа

увеличивается с 23,5 до 36° ПКВ, при  $p_e = 0,7$  МПа оно увеличивается с 22 до 30° ПКВ [9].

На рис. 3, б представлено влияние применения МТЭ на характеристики тепловыделения дизеля при оптимальных установочных УОВТ в зависимости от изменения нагрузки на номинальной частоте вращения.

Угол  $\varphi_{T_{\max}}$  при переходе на МТЭ и  $p_e = 0,38$  МПа увеличивается с 7,5 до 20° ПКВ после ВМТ, при  $p_e = 0,7$  МПа

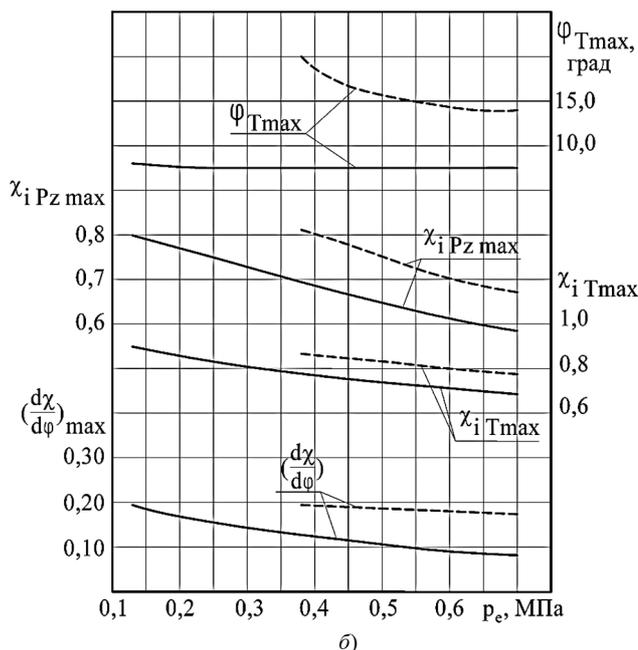
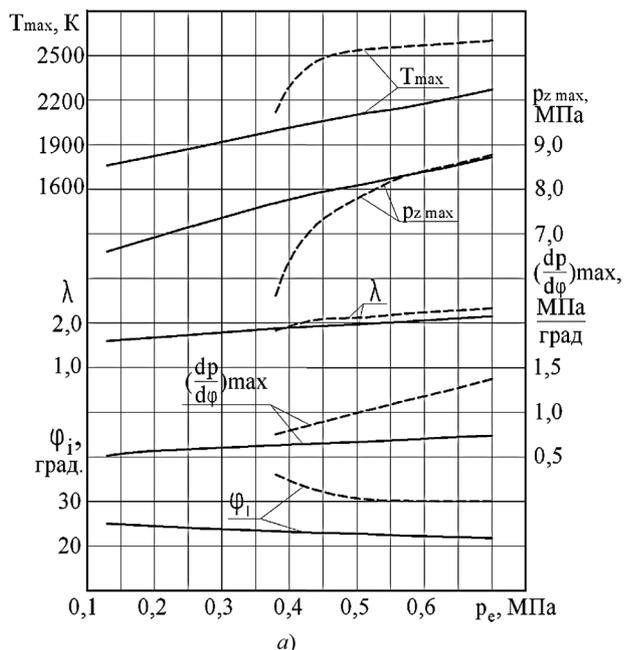


Рис. 3. Влияние применения МТЭ на индикаторные показатели (а) и характеристики тепловыделения (б) дизеля 4Ч 11,0/12,5 при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  в зависимости от изменения нагрузки:

— — ДТ; ---- — МТЭ

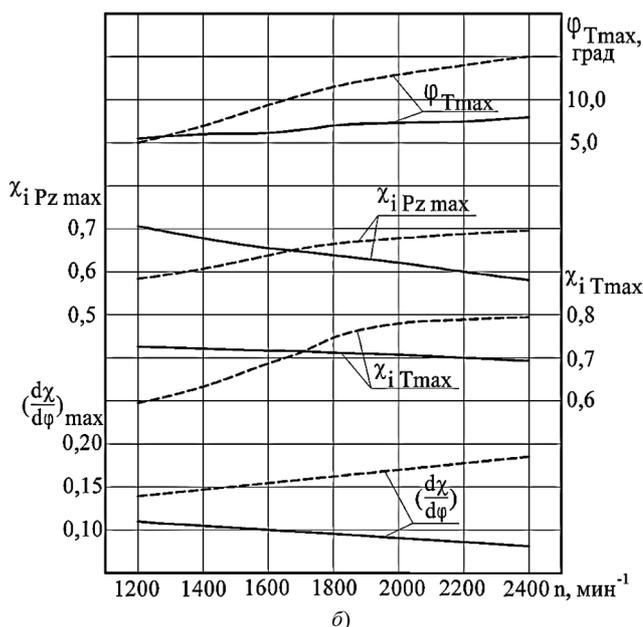
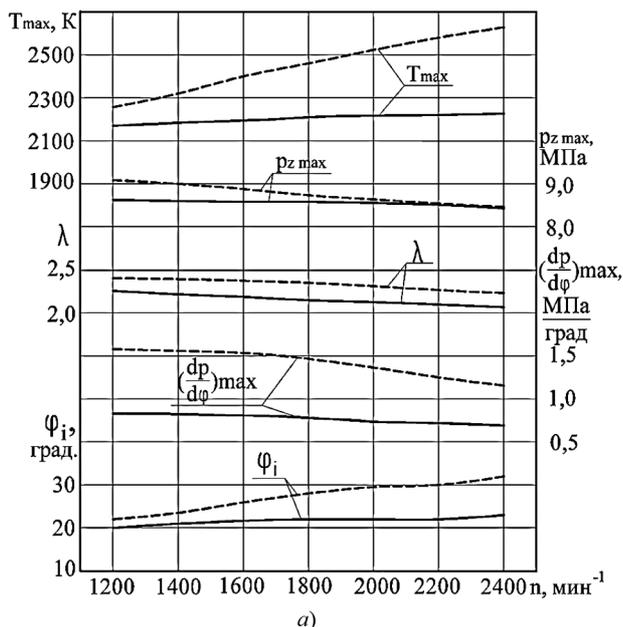


Рис. 4. Влияние применения МТЭ на показатели процесса сгорания (а) и характеристики тепловыделения (б) дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала:

— — ДТ; ---- — МТЭ

он увеличивается с 7,5 до 14° ПКВ после ВМТ. Значение  $(d\chi/d\varphi)_{\max}$  при переходе на МТЭ и  $p_e = 0,38$  МПа увеличивается с 0,127 до 0,194, при  $p_e = 0,7$  МПа оно увеличивается с 0,82 до 0,174.

Величина  $\chi_i p_z \max$  при переходе на МТЭ и  $p_e = 0,38$  МПа повышается с 0,69 до 0,81, при  $p_e = 0,7$  МПа она повышается с 0,59 до 0,67. Значение  $\chi_i T_{\max}$  при переходе на МТЭ и  $p_e = 0,38$  МПа возрастает с 0,78 до 0,87, при  $p_e = 0,7$  МПа оно возрастает с 0,69 до 0,78 [10].

На рис. 4, а представлено влияние применения МТЭ на показатели процесса сгорания дизеля при оптимальных установочных УОВТ в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала.

При переходе на МТЭ значения представленных параметров возрастают. Величина  $T_{\max}$  на малой частоте вращения ( $n = 1200$  мин<sup>-1</sup>) повышается с 2170 до 2260 К, при увеличении частоты вращения до  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> она повышается с 2230 до 2630 К. Значение  $p_z \max$  при  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> повышается с 8,6 до 9,1 МПа, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> оно повышается с 8,4 до 8,5 МПа [11].

Величина  $\lambda$  при  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> повышается с 2,26 до 2,4, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> она повышается с 2,07 до 2,23. Величина  $(dp/d\varphi)_{\max}$  при  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> повышается с 0,83 до 1,58 МПа/град., при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> она повышается с 0,69 до 1,16 МПа/град. Значение  $\varphi_i$  при  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> увеличивается с 20 до 22° ПКВ, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> оно увеличивается с 23 до 32° ПКВ.

На рис. 4, б представлено влияние применения МТЭ на характеристики тепловыделения дизеля при оптимальных установочных УОВТ в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала.

Угол  $\varphi_{T_{\max}}$  при переходе на МТЭ уменьшается при  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> с 5,5 до 5° ПКВ после ВМТ, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> он увеличивается с 8 до 15° ПКВ после ВМТ. Величина  $(d\chi/d\varphi)_{\max}$  при переходе на МТЭ и  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> возрастает с 0,11 до 0,139, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> она возрастает с 0,081 до 0,185.

Величина  $\chi_i p_z \max$  при переходе на МТЭ и  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> снижается с 0,71 до 0,58, при  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> она повышается с 0,58 до 0,7. Значения  $\chi_i T_{\max}$  при  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> составляют 0,73 при работе на ДТ и 0,6 при работе на МТЭ. При  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup> и переходе на МТЭ величина  $\chi_i T_{\max}$  повышается с 0,69 до 0,8 [12].

## Выводы

1. В ходе экспериментальных исследований рабочего процесса тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на МТЭ определены значения показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения на номинальном режиме работы дизеля:  $T_{\max}$  повышается на 16,2 % и составляет 2580 К;  $p_z \max$  повышается на 0,4 % и составляет 8,54 МПа;  $(dp/d\varphi)_{\max}$  повышается на 74,5 % и составляет 1,251 МПа/град.; угол  $\varphi_i$  увеличивается на 36,4 % и составляет 30° ПКВ;  $(d\chi/d\varphi)_{\max}$  возрастает в 2 раза и составляет 0,177;  $\chi_i T_{\max}$  увеличивается на 12,6 % и составляет 0,789;  $\chi_i p_z \max$  увеличивается на 14,7 % и составляет 0,688.

2. Для осуществления рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при использовании МТЭ в качестве основ-

ного топлива необходимо соблюдать следующие рекомендации:

— с целью предотвращения разложения МТЭ принятого состава ее не следует хранить в топливных баках более 18 ч;

— максимальная концентрация метанола в составе МТЭ не должна превышать 25 % из условия отсутствия неустойчивой работы дизеля и пропусков воспламенения в цилиндре;

— при работе на МТЭ для достижения наименьшего удельного расхода топлива, минимальных выбросов токсичных компонентов с ОГ и снижения жесткости процесса сгорания необходимо уменьшить установочный УОВТ до  $\Theta_{\text{впр}} \text{ МТЭ} = 23^\circ$ .

## Литература и источники

1. Романов С. А. Исследование рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на метаноле-топливной эмульсии: Дис. ... канд. техн. наук. Киров, 2010. 210 с.
2. Лиханов В. А., Лопатин О. П., Скрыбин М. Л. и др. Влияние применения метаноле-топливной эмульсии на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Мат-лы III Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2010. С. 82—84.
3. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе, метаноле- и этаноле-топливных эмульсиях // Транспорт на альтернативном топливе. 2016, № 2 (50). С. 43—49.
4. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование содержания оксидов азота в цилиндре тракторного дизеля с турбонаддувом при работе на природном газе // Тракторы и сельхозмашины. 2016, № 5. С. 3—8.
5. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Улучшение экологических показателей дизеля при работе на природном газе с рециркуляцией // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016, № 4 (52). С. 9.
6. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Моделирование эмиссии оксидов азота в цилиндре тракторного газодизеля // Тракторы и сельхозмашины. 2016, № 7. С. 3—8.
7. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Применение природного газа в дизеле с турбонаддувом // Транспорт на альтернативном топливе. 2016, № 4 (52). С. 35—43.
8. Лопатин О. П. Результаты индицирования рабочего процесса газодизеля на режиме максимального крутящего момента // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015, № 5 (18). С. 8—9.
9. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Модель расчета содержания оксидов азота в цилиндре газодизеля // Общество, наука, инновации: Мат-лы Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. Киров: Вятский ГУ, 2014. С. 2001—2004.
10. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизелей путем применения альтернативных видов топлива: Монография. Киров: Изд-во Вятской ГСХА, 2009. 500 с.
11. Лопатин О. П. Моделирование процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Молодой ученый. 2015, № 11. С. 370—372.
12. Лопатин О. П. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и содержание оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом // Молодой ученый. 2015, № 13. С. 139—141.

## References

1. Romanov S. A. *Issledovanie rabocheho protsessa dizelya 4Ch 11.0/12.5 pri rabote na metanolo-toplivnoy emul'sii* [Research of working process of 4Ch 11.0/12.5 diesel engine operating on methanol fuel emulsion]. PhD in Engineering thesis. Kirov, 2010, 210 p.

Окончание статьи В. А. Лиханова и др. Начало см. на стр. 14

2. Likhanov V. A., Lopatin O. P., Skryabin M. L., Romanov S. A., Toropov A. E. Effect of use of methanol-fuel emulsion on the parameters of combustion process, volume content and mass concentration of nitrogen oxides in the cylinder of 4Ch 11.0/12.5 diesel engine depending on the load change. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley dvigateley vnutrennego sgoraniya. Mat-ly III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Improving the operational performance of internal combustion engines. Proc. of the III int. sci. and pract. conf.]. Saint Petersburg, 2010, pp. 82–84 (in Russ.).
3. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Study of power and economic characteristics of 4Ch 11.0/12.5 diesel engine operating on natural gas, methanol and ethanol fuel emulsions. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2016, no. 2 (50), pp. 43–49 (in Russ.).
4. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Study of nitrogen oxides content in the cylinder of turbocharged tractor diesel engine operating on natural gas. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2016, no. 5, pp. 3–8 (in Russ.).
5. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Improving the environmental performance of diesel engine operating on natural gas with recirculation. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 4 (52), p. 9 (in Russ.).
6. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Modeling of nitrogen oxides emission in the cylinder of tractor gas-diesel engine. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2016, no. 7, pp. 3–8 (in Russ.).
7. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Use of natural gas in turbocharged diesel engine. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2016, no. 4 (52), pp. 35–43 (in Russ.).
8. Lopatin O. P. Results of indexing of gas-diesel engine operating process at maximum torque. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya*, 2015, no. 5 (18), pp. 8–9 (in Russ.).
9. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Model for calculation of nitrogen oxides level in the cylinder of gas-diesel engine. *Obshchestvo, nauka, innovatsii: Mat-ly Vseros. ezhegod. nauch.-prakt. konf.* [Society, science, innovation. Proc. of all-Russian annual sci. and pract. conf.]. Kirov, Vyatka State University, 2014, pp. 2001–2004 (in Russ.).
10. Likhanov V. A., Lopatin O. P. *Snizhenie soderzhaniya oksidov azota v otrabotavshikh gazakh dizeley putem primeneniya al'ternativnykh vidov topliva* [Reduction of nitrogen oxides content in the exhaust gases of diesel engines by using alternative fuels]. Kirov, Vyatka State Agricultural Academy Publ., 2009, 500 p.
11. Lopatin O. P. Simulation of the process of nitrogen oxides formation in the cylinder of gas-diesel engine. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 11, pp. 370–372 (in Russ.).
12. Lopatin O. P. Effect of use of natural gas on the parameters of combustion process and nitrogen oxides content in the cylinder of turbocharged diesel engine. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 13, pp. 139–141 (in Russ.).