

УДК 621.436

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

Лопатин О. П., доктор технических наук, профессор

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Вятский государственный агротехнологический университет»,
г. Киров, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения в качестве альтернативного топлива для тракторного дизеля природного газа (ПГ) и спирто-топливных эмульсий (СТЭ). Для научного представления действительной картины процесса сгорания в тракторном дизеле, работающем на ПГ и СТЭ, проведено индицирование его рабочего процесса и детальное описание процесса сгорания. В результате проведенных экспериментальных исследований установлены зависимости влияния режимов работы тракторного дизеля на ПГ, метанола- (МТЭ) и этанола-топливных эмульсиях (ЭТЭ) на показатели его процесса сгорания. Определены оптимальные значения показателей процесса сгорания при работе тракторного дизеля на альтернативных топливах указанных составов.

Ключевые слова: тракторный дизель, природный газ, метанола-топливная эмульсия, этанола-топливная эмульсия, индикаторная диаграмма, процесс сгорания

INVESTIGATION OF THE COMBUSTION PROCESS OF THE TRACTOR DIESEL WORKING ON NATURAL GAS AND ALCOHOL-FUEL EMULSIONS

Lopatin O. P., doctor of technical sciences, professor

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Vyatka State Agrotechnological University», Kirov, Russia

Annotation. The article discusses the use of natural gas (NG) and alcohol-fuel emulsions (AFE) as the alternative fuel for a tractor diesel. For the scientific representation of the urgent picture of the combustion process in the tractor diesel engine working on NG and AFE, its working process is indicated, and the detailed description of the combustion process is carried out. As a result of the conducted experimental studies, the dependences of the influence of the operating modes of the tractor diesel powered by NG, methanol- (MFE) and ethanol fuel emulsions (EFE) on



the parameters of its combustion process have been established. The optimal values of the combustion process parameters during the operation of a tractor diesel engine on alternative fuels of these compositions have been determined.

Keywords: tractor diesel, natural gas, methanol-fuel emulsion, ethanol-fuel emulsion, indicator diagram, combustion process

С начала развития двигателей внутреннего сгорания так называемая индикаторная диаграмма – кривая изменения давления в цилиндре поршневого двигателя на протяжении рабочего цикла – используется как одно из средств описания и анализа рабочего процесса.

Одно из ценных качеств индикаторной диаграммы, издавна привлекающее внимание исследователей, заключается в том, что она представляет непосредственную запись действительных физических величин, значения которых можно наблюдать без всяких дополнительных расчетов на самой диаграмме. Индикаторная диаграмма дает возможность получить важные сведения о протекании рабочего процесса. Непосредственно из индикаторной диаграммы можно получить данные о величине максимального давления сгорания p_z , скорости повышения давления (жесткости процесса сгорания) $dp/d\phi$ на различных участках, давления на впуске и выпуске, о значении угла ϕ_i , соответствующего периоду задержки воспламенения [1-3]. Так, индикаторная диаграмма является одним из эффективных средств наблюдения за самовоспламенением в дизеле. Полезная площадь индикаторной диаграммы в координатах $p-v$ определяет работу газов внутри цилиндра за один рабочий цикл, а зная работу цикла, легко определить такие основные индикаторные показатели рабочего процесса, как среднее индикаторное давление и индикаторный КПД [4-6].

Процесс сгорания в тракторном дизеле, работающем на альтернативных топливах, еще более чувствителен в сравнении со штатным дизельным процессом (ДП) ко многим конструкционным и эксплуатационным факторам.



Возникновение и развитие горения, полнота сгорания топливо-воздушной смеси альтернативного топлива также определяются особенностями и скоростями реакций, условиями тепло- и массообмена в зоне пламени и теплоотдачей в стенки цилиндра. Скорость распространения фронта пламени в процессе сгорания зависит от химических и физических факторов и в совокупности со скоростью химической реакции окисления молекул альтернативного топлива в конечном счете влияет на продолжительность сгорания массы рабочей смеси в камере сгорания дизеля [7-9]. Например, из-за неравномерного распределения исследуемого топлива по цилиндрам состав топливо-воздушной смеси может оказаться близким к концентрационным пределам распространения пламени, в связи с чем возможны пропуски воспламенения и сгорания в отдельных цилиндрах или процесс горения может становиться медленным, переходя в фазу расширения [10-12].

Очевидно, что отличительной особенностью процессов смесеобразования и горения в дизеле, работающем как на ПГ с запальной порцией дизельного топлива, так и на СТЭ, будет являться по сравнению с ДП неоднородность горючей смеси по объему цилиндра, присутствовать совершенно другая испаряемость горючего и несовпадение по времени процессов образования топливо-воздушной смеси и ее горение [13-15]. Применение альтернативных топлив с другим химическим составом и локальными условиями может приводить к отличительным показателям процесса сгорания и даже к воспламенению во время развития факела распыла. Следовательно, для научного представления действительной картины процесса сгорания в дизеле, работающего на ПГ и СТЭ, необходимо детальное и достаточно достоверное описание данного процесса, что можно выполнить только после проведения индицирования рабочего процесса дизеля [16-18].

На рисунке 1 изображены индикаторные диаграммы тракторного дизеля



при частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и установочном угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. Анализируя представленные на данном режиме индикаторные диаграммы хорошо видно увеличение периода задержки воспламенения (ПЗВ) и максимального давления цикла p_z при работе на всех исследуемых альтернативных топливах [19]. Так, применение ЭТЭ увеличивает угол, соответствующий ПЗВ, φ_i на $5,5^\circ$, МТЭ, газодизельного процесса (ГДП) – на $7,5^\circ$ по отношению к ДП. При этом p_z увеличивается при работе по ГДП и МТЭ на $0,4 \text{ МПа}$, на ЭТЭ – на $0,8 \text{ МПа}$.

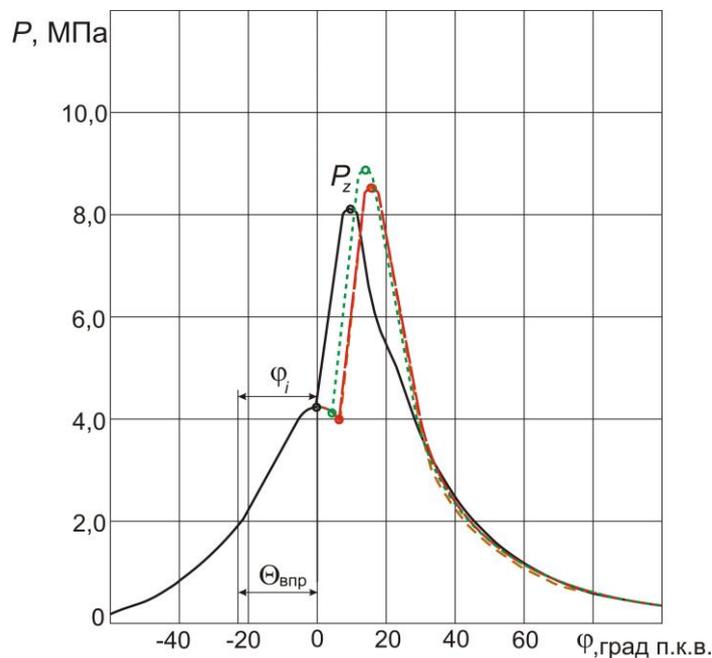


Рисунок 1 – Индикаторные диаграммы тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5

при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$;

— ДП; — — — ГДП; — — — — ЭТЭ; — · — · — МТЭ

На рисунке 2 изображены параметры процесса сгорания тракторного дизеля, зависящие от $\Theta_{\text{впр}}$, при $n=2200 \text{ мин}^{-1}$. Рассматривая экспериментальные кривые параметров процесса горения в цилиндре дизеля, работающего по ГДП, необходимо выделить, что с увеличением $\Theta_{\text{впр}}$ возрастают величины



максимального давления цикла p_z , максимальной осредненной температуры T_{\max} , степени повышения давления λ , жесткости процесса горения $(dp/d\varphi)_{\max}$ и уменьшается значение угла φ_i , соответствующего ПЗВ [20-22].

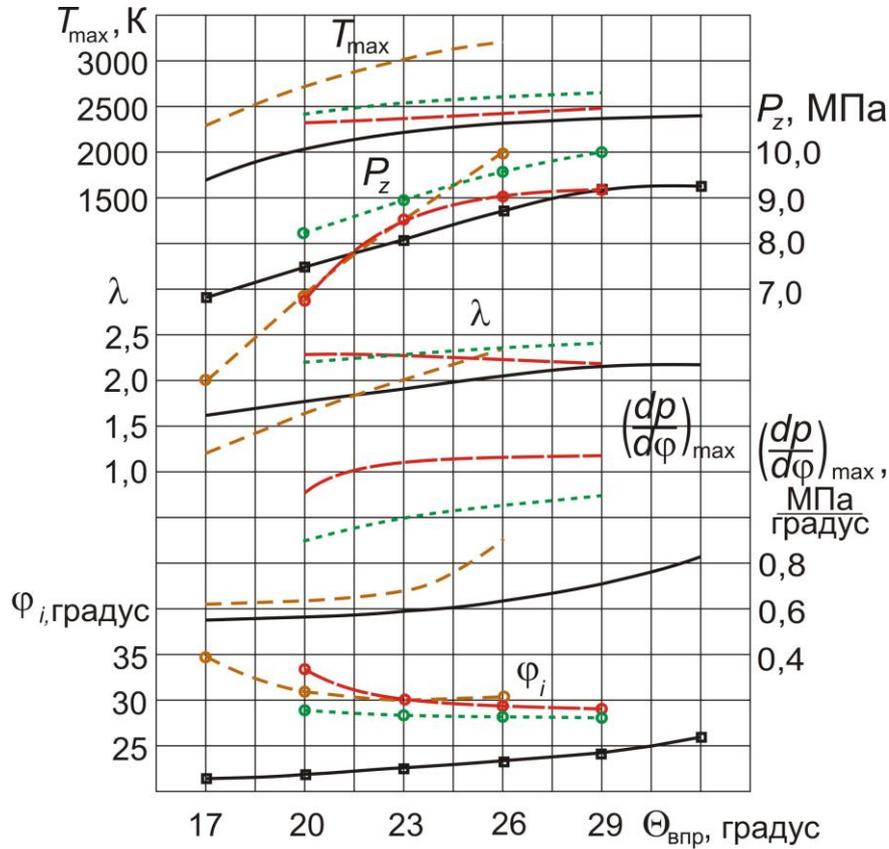


Рисунок 2 – Показатели процесса сгорания тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

— ДП; — ГДП; — ЭТЭ; — МТЭ

Рассматривая отличия работы дизеля на МТЭ от ДП необходимо выделить, что величины параметров процесса сгорания на МТЭ повышаются. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдаются рост T_{\max} на 11,0 %, p_z на 4,9 %, $(dp/d\varphi)_{\max}$ – в 2,1 раза, степени повышения давления λ – на 19,0 %, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, – на 33,3 %. При установочном угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ



наблюдаются рост T_{\max} – на 7,5 %, p_z – на 3,5 %, $(dp/d\varphi)_{\max}$ в 2,0 раза, степени повышения давления λ – на 6,8 %, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, – на 28,3 %. Изучая графические зависимости 4Ч 11,0/12,5 на ЭТЭ и дизельном топливе, следует пояснить, что величины параметров процесса сгорания на ЭТЭ как и на МТЭ, увеличиваются. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдаются рост T_{\max} – на 14,6 %, p_z – на 9,9 %, $(dp/d\varphi)_{\max}$ – на 71,2 %, степени повышения давления λ – на 19,5 %, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, – на 24,4 %. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдается рост T_{\max} – на 13,2 %, p_z – на 11,5 %, $(dp/d\varphi)_{\max}$ – на 65,1 %, степени повышения давления λ – на 14,1 %, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, – на 21,7 %.

На рисунке 3 представлены показатели процесса сгорания тракторного дизеля на различных нагрузочных режимах работы при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$.

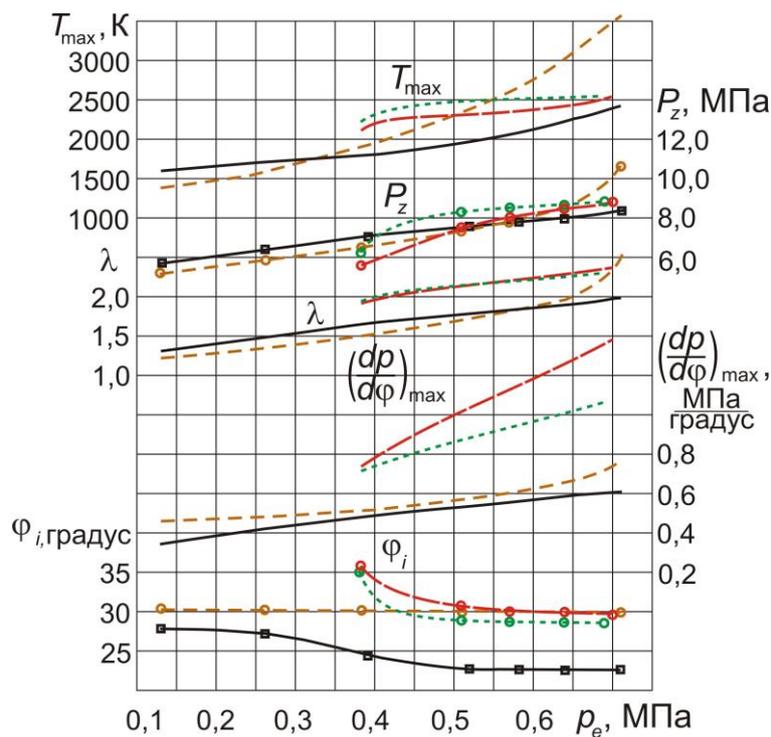


Рисунок 3 – Показатели процесса сгорания тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

— ДП; - - - ГДП; - - - ЭТЭ; - - - МТЭ



Рассматривая работу дизеля на ПГ и СТЭ хорошо видно, что с увеличением нагрузки происходит «классический» рост максимальной осредненной температуры газов в цилиндре T_{\max} , максимального давления p_z , степени повышения давления λ , жесткости процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ и снижение угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Так, например, при работе на ПГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,71 МПа значения T_{\max} увеличиваются от 1400 до 3560 К, или в 2,5 раза; $p_{z \max}$ – с 5,2 до 10,4 МПа, или ровно в 2 раза; λ – с 1,2 до 2,5, или в 2,1 раза; $(dp/d\varphi)_{\max}$ – от 0,46 до 0,76 МПа/град, или на 65,2 %, и снижение φ_i с 30,5 до 29,5° п.к.в.

На основании проведенных исследований на номинальном режиме работы и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ применение ПГ, МТЭ и ЭТЭ приводит к значениям параметров процесса сгорания тракторного дизеля, указанным в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследований показателей процесса сгорания тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме

Топливо	Показатели				
	T_{\max} , К	p_z , МПа	λ	$(dp/d\varphi)_{\max}$, МПа/град	φ_i , градус
Дизельное	2190	8,1	1,90	0,59	22,5
ПГ	3010 (увеличение на 37,4 %)	8,5 (увеличение на 4,9 %)	2,0 (увеличение на 5,3 %)	0,69 (увеличение на 17,0 %)	30,0 (увеличение на 33,3 %)
МТЭ	2430 (увеличение на 11,0 %)	8,5 (увеличение на 4,9 %)	2,26 (увеличение на 19,0 %)	1,25 (увеличение в 2,1 раза)	30,0 (увеличение на 33,3 %)
ЭТЭ	2510 (увеличение на 14,6 %)	8,9 (увеличение на 9,9 %)	2,27 (увеличение на 19,5 %)	1,01 (увеличение на 71,2 %)	28,0 (увеличение на 24,4 %)

На рисунке 4 изображены индикаторные диаграммы тракторного дизеля при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. На режиме максимального крутящего момента также происходит увеличение ПЗВ и максимального давления цикла p_z при работе на всех исследуемых альтернативных топливах. Так, при работе по ГДП



величина φ_i увеличивается на $2,0^\circ$, на МТЭ – на $5,0^\circ$, на ЭТЭ – на $5,5^\circ$ по сравнению с ДП. При этом p_z увеличивается при работе на МТЭ – на $0,3$ МПа, на ЭТЭ – на $0,6$ МПа, по ГДП – на $2,4$ МПа.

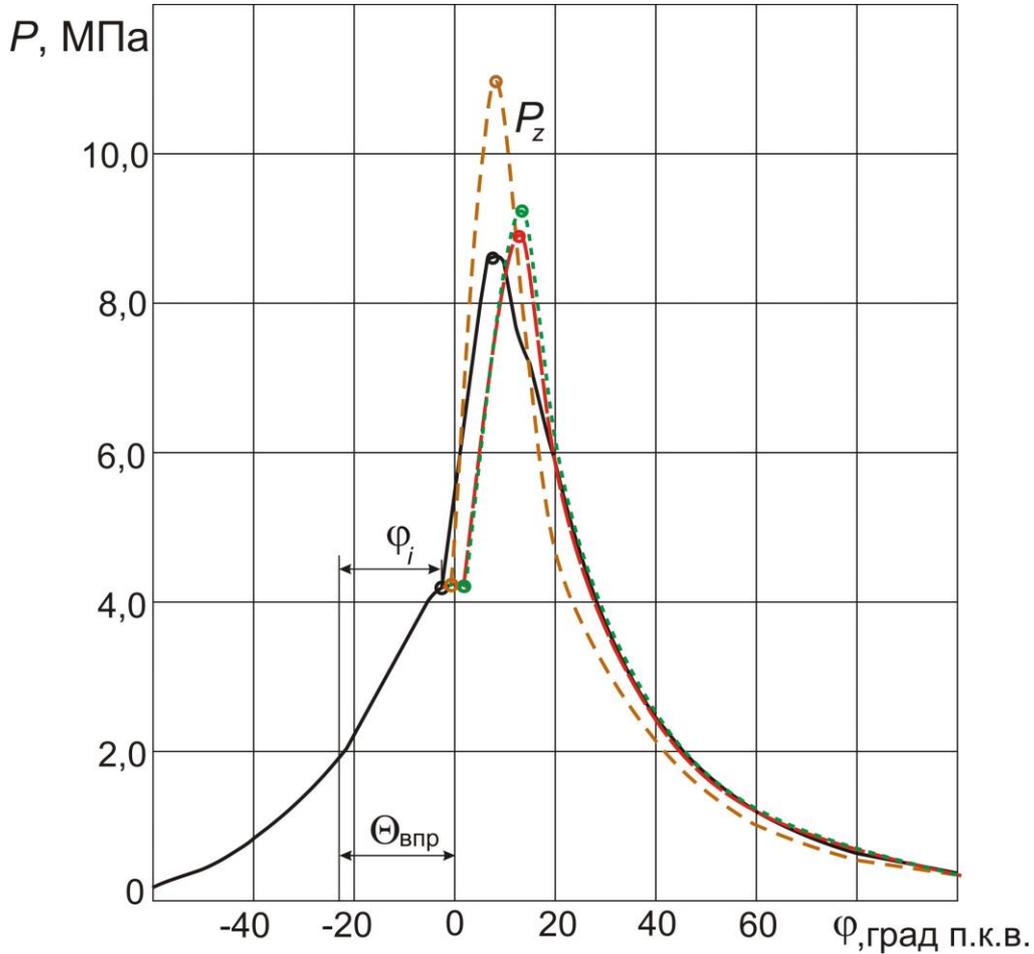


Рисунок 4 – Индикаторные диаграммы дизеля тракторного 4Ч 11,0/12,5

при $\Theta_{впр} = 23^\circ$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$:

— ДП; - - - ГДП; ···· ЭТЭ; - · - МТЭ

Результаты исследований характеристик процесса горения дизеля 4Ч 11,0/12,5, зависящие от $\Theta_{впр}$, при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ изображены на рисунке 5.



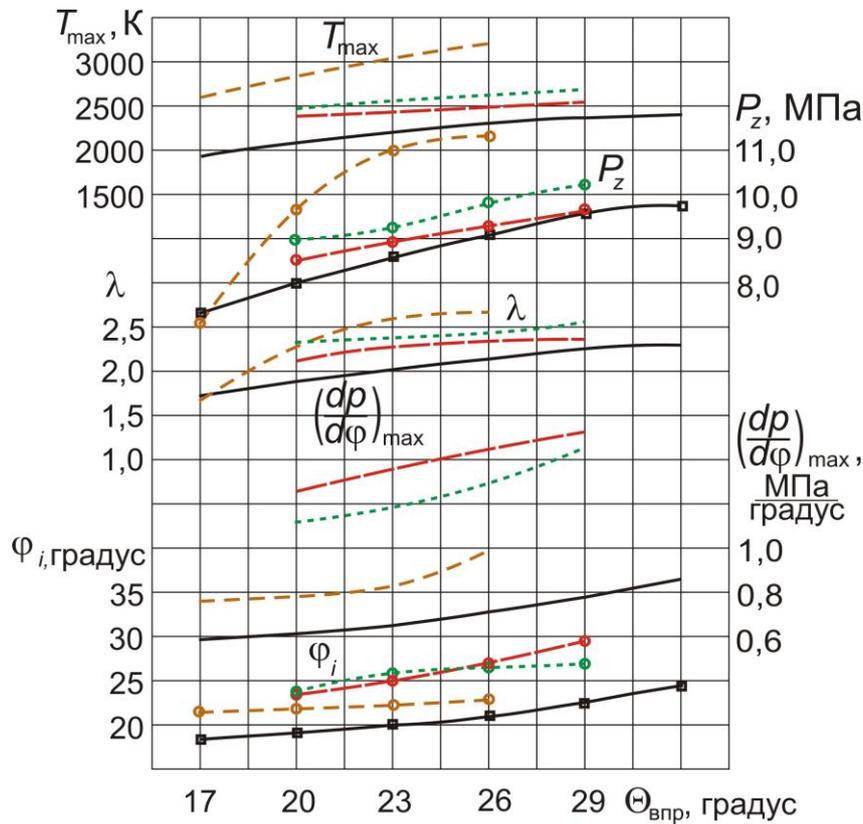


Рисунок 5 – Показатели процесса сгорания тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{впр}$ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

— ДП; - - - ГДП; ···· ЭТЭ; - · - · МТЭ

Рассматривая кривые параметров процесса сгорания ГДП, необходимо отметить, что с увеличением $\Theta_{впр}$ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ возрастают величины T_{max} , p_z , λ , $(\frac{dp}{d\phi})_{max}$ и значения угла ϕ_i , соответствующего ПЗВ. Исследуя зависимости работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на МТЭ и дизельном топливе при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, необходимо выделить увеличение параметров процесса сгорания на МТЭ. При $\Theta_{впр} = 23^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдается увеличение значений T_{max} – на 11,3 %, p_z – на 3,5 %, $(\frac{dp}{d\phi})_{max}$ – в 2,1 раза, степени повышения давления λ – на 15,0 %, угла ϕ_i , соответствующего ПЗВ, – на 25,0 %. При $\Theta_{впр} = 26^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдается рост T_{max} – на 9,2 %, p_z – на 2,2 %, $(\frac{dp}{d\phi})_{max}$ – в 2,0 раза, степени повышения давления λ – на 7,3 %, ϕ_i – на 2,5 %.



угла φ_i , соответствующего ПЗВ, – на 28,6 %. Исследуя графические зависимости работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ЭТЭ и дизельном топливе следует отметить увеличение параметров процесса сгорания на ЭТЭ, как и на МТЭ. Так, при $\Theta_{впр} = 23^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдается рост T_{max} – на 14,9 %, – p_z – на 7,0 %, $(dp/d\varphi)_{max}$ – на 85,9 %, степени повышения давления λ – на 18,0 %, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, – на 27,5 %. При $\Theta_{впр} = 26^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдается рост T_{max} – на 14,0 %, p_z – на 7,7 %, $(dp/d\varphi)_{max}$ – на 84,5 %, степени повышения давления λ на 11,5%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 26,2%.

На рисунке 6 представлены показатели процесса сгорания тракторного дизеля при частоте вращения 1700 мин^{-1} на различных нагрузочных режимах работы.

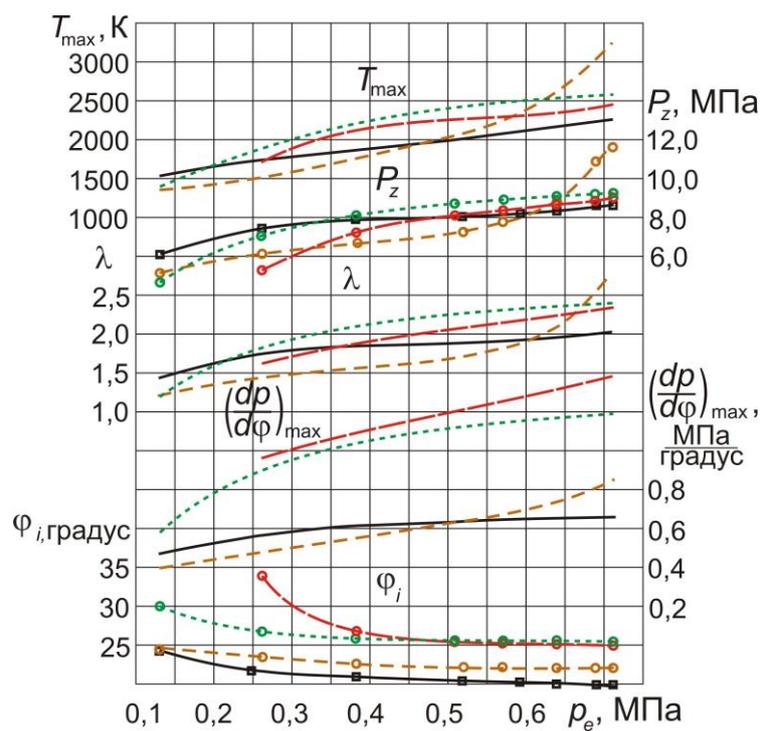


Рисунок 6 – Показатели процесса сгорания тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{впр}$ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$:

— ДП; — — — ГДП; - - - ЭТЭ; - · - · - МТЭ



Рассматривая работу дизеля на ПГ и СТЭ, хорошо видно, что с увеличением нагрузки, также как и при номинальной частоте вращения, происходит «классический» рост T_{\max} , p_z , λ , $(dp/d\varphi)_{\max}$ и снижение угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Так, при работе на МТЭ в диапазоне изменения p_e от 0,26 до 0,71 МПа повышение значений T_{\max} составляет от 1690 до 2460 К, p_z – от 5,2 до 9,0 МПа; λ – от 1,61 до 2,32; $(dp/d\varphi)_{\max}$ – с 0,97 до 1,42 МПа/град; φ_i снижается с 34,0 до 25,0°п.к.в.

Результаты исследований параметров процесса сгорания тракторного дизеля при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты исследований показателей процесса сгорания тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту

Топливо	Показатели				
	T_{\max} , К	p_z , МПа	λ	$(dp/d\varphi)_{\max}$, МПа/град	φ_i , градус
Дизельное	2210	8,6	2,0	0,64	20,0
ПГ	3050 (увеличение на 38,0 %)	11,0 (увеличение на 27,9 %)	2,60 (увеличение на 30,0 %)	0,83 (увеличение на 29,7 %)	22,0 (увеличение на 10,0%)
МТЭ	2460 (увеличение на 11,3 %)	8,9 (увеличение на 3,5 %)	2,30 (увеличение на 15,0 %)	1,36 (увеличение в 2,1 раза)	25,0 (увеличение на 25,0 %)
ЭТЭ	2540 (увеличение на 14,9 %)	9,2 (увеличение на 7,0 %)	2,36 (увеличение на 18,0 %)	1,19 (увеличение на 85,9 %)	25,5 (увеличение на 27,5 %)

Выводы. В результате экспериментальных исследований показателей процесса сгорания тракторного дизеля при работе на ПГ и СТЭ можно сделать следующие выводы:

1. На основании проведенных исследований показателей процесса



сгорания тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 предложено значение оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива, равное 23° . Это же значение рекомендовано и для дизельного процесса.

2. Установлены зависимости влияния режимов работы тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ, МТЭ и ЭТЭ на показатели его процесса сгорания.

3. Определены оптимальные значения показателей процесса сгорания при работе тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$.

При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$) получены следующие результаты: ДП – $T_{\text{max}} = 2190 \text{ К}$; $p_z = 8,1 \text{ МПа}$; $\lambda = 1,90$; $(dp/d\varphi)_{\text{max}} = 0,59 \text{ МПа/град}$; $\varphi_i = 22,5^\circ$; ГДП – $T_{\text{max}} = 3010 \text{ К}$ (увеличение на 37,4 %); $p_z = 8,5 \text{ МПа}$ (увеличение на 4,9 %); $\lambda = 2,0$ (увеличение на 5,3 %); $(dp/d\varphi)_{\text{max}} = 0,69 \text{ МПа/град}$ (увеличение на 17,0 %); $\varphi_i = 30,0^\circ$ (увеличение на 33,3 %); МТЭ – $T_{\text{max}} = 2430 \text{ К}$ (увеличение на 11,0 %); $p_z = 8,5 \text{ МПа}$ (увеличение на 4,9 %); $\lambda = 2,26$ (увеличение на 19,0 %); $(dp/d\varphi)_{\text{max}} = 1,25 \text{ МПа/град}$ (увеличение в 2,1 раза); $\varphi_i = 30,0^\circ$ (увеличение на 33,3 %); ЭТЭ – $T_{\text{max}} = 2510 \text{ К}$ (увеличение на 14,6 %); $p_z = 8,9 \text{ МПа}$ (увеличение на 9,9 %); $\lambda = 2,27$ (увеличение на 19,5 %); $(dp/d\varphi)_{\text{max}} = 1,01 \text{ МПа/град}$ (увеличение на 71,2 %); $\varphi_i = 28,0^\circ$ (увеличение на 24,4 %).

При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$): ДП – $T_{\text{max}} = 2210 \text{ К}$; $p_z = 8,6 \text{ МПа}$; $\lambda = 2,0$; $(dp/d\varphi)_{\text{max}} = 0,64 \text{ МПа/град}$; $\varphi_i = 20,0^\circ$; ГДП – $T_{\text{max}} = 3050 \text{ К}$ (увеличение на 38,0 %); $p_z = 11,0 \text{ МПа}$ (увеличение на 27,9 %); $\lambda = 2,6$ (увеличение на 30,0 %); $(dp/d\varphi)_{\text{max}} = 0,83 \text{ МПа/град}$ (увеличение на 29,7 %); $\varphi_i = 22,0^\circ$ (увеличение на 10,0 %); МТЭ – $T_{\text{max}} = 2460 \text{ К}$ (увеличение на 11,3 %); $p_z = 8,9 \text{ МПа}$ (увеличение на 3,5 %); $\lambda = 2,30$ (увеличение на 15,0 %); $(dp/d\varphi)_{\text{max}} = 1,36 \text{ МПа/град}$ (увеличение в 2,1 раза); $\varphi_i = 25,0^\circ$ (увеличение на 25,0 %); ЭТЭ – $T_{\text{max}} = 2540 \text{ К}$ (увеличение на 14,9 %); $p_z = 9,2 \text{ МПа}$ (увеличение



на 7,0 %); $\lambda = 2,36$ (увеличение на 18,0 %); $(dp/d\varphi)_{\max} = 1,19$ МПа/град (увеличение на 85,9 %); $\varphi_i = 25,5^\circ$ (увеличение на 27,5 %).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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. V. 308. P. 121926.
2. The influence of castor biodiesel blending ratio on engine performance including the determined diesel particulate matters composition / A. M. A. Attia, M. Nour, A. I. El-Seesy, S. A. Nada, A. R. Kulchitskiy // Energy. 2022. V. 239. P. 121951.
3. Effect of ethanol additives on combustion and emissions of a diesel engine fueled by palm oil biodiesel at idling speed / G. Wu, J. C. Ge, N. J. Choi // Energies. 2021. V. 14, № 5. P. 14051428.
4. Exergetic, economic, and environmental life cycle assessment analyses of a heavy-duty tractor diesel engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends / H. Hosseinzadeh-Bandbafha, S. S. Lam, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, P. Mohammadi, S. Rafiee, B. Ghobadian // Energy Conversion and Management. 2021. V. 241. P. 114300.
5. Combined influence of supercharging, egr, biodiesel and ethanol on emissions of a diesel engine: proposal of an optimization strategy / V. Ayhan, İ. Cesur, Ç. Çangal, A. Safa // Energy. 2020. V. 207. P. 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. V. 275. P. 117893.



7. Combustion investigation of ternary blend mixture of biodiesel/n-butanol/diesel: ci engine performance and emission control / K. Thakkar, S. S. Kachhwaha, P. Kodgire, S. Srinivasan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. V. 137. P. 110468.
8. Mixture formation and combustion process of a biodiesel fueled direct injection rotary engine (dire) considering injection timing, spark timing and equivalence ratio – CFD study / P. Otchere, J. Pan, B. Fan, W. Chen, Y. Lu, L. Jianxing // Energy Conversion and Management. 2020. V. 217. P. 112948.
9. Influence of waste vegetable oil biodiesel and hexanol on a reactivity controlled compression ignition engine combustion and emissions / J. J. Thomas, V. R. Sabu, G. Nagarajan, S. Kumar, G. Basrin // Energy. 2020. V. 206. P. 118199.
10. Research of energy and ecological indicators of a compression ignition engine fuelled with diesel, biodiesel (RME-based) and isopropanol fuel blends / A. Rimkus, J. Matijošius, S. M. Rayapureddy // Energies. 2020. V. 13, № 9. P. 2398.
11. Performance, combustion, and emission characteristics of a CI engine fueled with emulsified diesel-biodiesel blends at different water contents / W. N. Maawa, R. Mamat, G. Najafi, L. P. H. De Goey // Fuel. 2020. V. 267. P. 117265.
12. Lopatin O.P. Mathematical problem in the construction of kinetic equations of alternative fuel oxidation in an internal combustion engine // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 919. 2020. 052033.
13. Ignition delay and its influence on the performance of a diesel engine operating with different diesel–biodiesel fuels / L. Miron, R. Chiriac, V. Bădescu, M. Brabec // Energy Reports. 2021. V. 7. P. 5483-5494.
14. Study on performance of compression engine operated by biodiesel fuel / H. Kaletnik, V. Mazur, I. Gunko, V. Ryaboshapka, V. Bulgakov, V. Raide, R. Ilves, J. Olt // Agronomy Research. 2020. V. 18. Special Issue 1. P. 862-887.



15. Лиханов В. А., Лопатин О. П., Юрлов А. С. Исследование нагрузочных режимов токсичности отработавших газов тракторного дизеля, работающего на метаноле и метиловом эфире рапсового масла // Вестник Чувашской ГСХА. 2019. № 3 (10). С. 95-98.
16. Impact of water – biodiesel – diesel nano-emulsion fuel on performance parameters and diesel engine emission / M. Abdollahi, B. Ghobadian, G. Najafi, S. S. Hoseini, M. Mofijur, M. Mazlan // Fuel. 2020. V. 280. P. 118576.
17. Emissions from a medium-duty CRDI engine fuelled with diesel-biodiesel blends / K. Duda, S. Wierzbicki, M. Mikulski, Ł. Konieczny, B. Łazarz, M. Letuń-Łątka // Transport Problems. 2021. V. 16, № 1. P. 39-49.
18. Lopatin O. P. The effect of operational modes of diesel engines to emissions of nitrogen oxides // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 862. 2020. 062087.
19. Performance and emission characteristics of biodiesel-blend in diesel engine: a review / Y. Palani, C. Devarajan, D. Manickam, S. Thanikodi // Environmental Engineering Research. 2022. V. 27, № 1. P. 200338.
20. Influence of nano-additives on engine behaviour using diesel-biodiesel blend / A. Devaraj, M. Nagappan, D. Yogaraj, O. Prakash, Y. A. Rao, A. Sharma // Materials Today: Proceedings. 2022. V. 62. P. 2266-2270.
21. Lopatin O. P. Chemistry of the process of formation of nitrogen oxides in the combustion chamber of gas-diesel // Journal of Physics : Conf. Series 1515. 2020. 052004.
22. Лиханов В. А., Лопатин О. П., Юрлов А. С. Исследование эффективных показателей тракторного дизеля, работающего на метиловом эфире рапсового масла и метаноле при различных нагрузочных режимах // Вестник Чувашской ГСХА. 2019. № 4 (11). С. 105-109.

