

и показатели дорожно-транспортной аварийности, т.е. обеспечить стыковку указанных госпрограмм по целевым показателям и индикаторам.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 03.10.2013 № 864 «О федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах».

2. Региональные государственные программы (подпрограммы) по повышению БДД субъектов Российской Федерации.

3. Разработка механизма установления индивидуальных целевых заданий для субъектов Российской Федерации по снижению уровня дорожно-транспортной аварийности на период до 2020 года и закреплению субсидиарной ответственности федерального центра и субъектов Российской Федерации за достижение целей деятельности по обеспечению безопасности дорожного движения [Текст]: Отчет о НИР (Этап № 1-2) / НИИАТ; рук. С.Н. Карасевич; исполн: [С.А. Аземша, В.В. Механошин, Д.В. Капский, Г.М. Кухаренок, Д.В. Рожанский, Д.В. Мозалевский, В.Н. Кузьменко, Д.М. Казьмин, Е.В. Ковш] – Москва; 2014. (Государственный контракт от 25.04.2014 г. № 14/7/1/006).

УДК 621.436

ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СМЕСЕЙ МЕТИЛОВОГО ЭФИРА ЖИРНЫХ КИСЛОТ РАПСОВОГО МАСЛА С ЭТАНОЛОМ INDICATORS OF WORKFLOW WHEN USING DIESEL BLENDS METHYL ESTER OF RAPESEED OIL FATTY ACIDS WITH ETHANOL

Кухаренок Г.М., доктор технических наук, профессор;

Петрученко А.Н., кандидат технических наук, доцент

(Белорусский национальный технический университет)

Kukharenok G.M., Doctor of Technical Sciences, Professor;

Petruchenko A.N., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

(Belarusian National Technical University)

Анотация. Приведены результаты исследований и выполнен анализ рабочего процесса дизельного двигателя, работающего на смесях метилового эфира жирных кислоты рапсового с этанолом

Abstract. The results of research and the analysis of the working process of the diesel engine running on a mixture of methyl esters of fatty acid rapeseed and ethanol.

Известно достаточно большое количество исследований, направленных на разработку технических решений по применению растительных масел в качестве моторных топлив [1, 2]. Однако до сих пор существуют серьезные проблемы, ограничивающие широкое использование таких топлив. К ним можно отнести: нагаро- и шлакообразование, узкие температурные пределы применения, малые значения цетанового числа, высокие температуры кипения.

В какой-то мере эти проблемы решаются переработкой растительных масел с целью получения эфиров жирных кислот. В результате получается топливо, имеющее эксплуатационные свойства сравнимые со стандартным дизельным топливом (ДТ). Однако такие важные показатели, оказывающие влияние на процесс смесеобразования, как динамическая вязкость и коэффициент поверхностного натяжения оказываются выше, так например эти показатели у метилового эфира жирных кислот рапсового масла (МЭРМ) соответственно на 0,004 Па·с и $3,6 \cdot 10^{-3}$ Н/м выше чем у ДТ.

Для режима С100 13-ступенчатого испытательного цикла ESC для дизеля Д-249 были проведены расчётные исследования, в которых последовательно уменьшались сначала динамическая вязкость с 0,007 до 0,002 Па·с, а затем коэффициент поверхностного натяжения с 0,031 до 0,027 Н/м. Результаты показывают, что уменьшение обоих параметров приводит к улучшению показателей дизеля: удельный индикаторный расход топлива уменьшается, а среднее индикаторное давление увеличивается до 1 % на каждые 0,001 Па·с снижения динамической вязкости и до 0,2 % на каждые 0,001 Н/м уменьшения коэффициента поверхностного натяжения. При этом наблюдается некоторый рост максимальных значений давления и температуры.

При снижении динамической вязкости с 0,007 до 0,002 Па·с максимальное давление цикла возрастает почти на 0,5 МПа (~3,5 %), рост максимальной температуры цикла более заметен – 90° (~5,5 %).

Увеличение максимальных значений давления и температуры составляет соответственно 0,035 МПа (~0,2 %) и 8° (~0,5 %) при уменьшении коэффициента поверхностного натяжения с 0,031 до 0,027 Н/м

Улучшение показателей работы дизеля при уменьшении анализируемых параметров МЭРМ связано с ростом мелкости распыливания топлива, что приводит к уменьшению продолжительности сгорания топлива в среднем на 2...3 град ПКВ на каждые 0,001 Па·с снижения динамической вязкости и до 1,5 град ПКВ на каждые 0,001 Н/м уменьшения коэффициента поверхностного натяжения.

Уменьшить величины динамической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения можно проведя целенаправленные изменения структуры молекул МЭРМ. Этот путь сложен, не исключены изменения ухудшающие другие эксплуатационные показатели топлива. Вязкость и коэффициент поверхностного натяжения и можно скорректированы добавкой топлив,

имеющих более низкие значения динамической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения, чем у ДТ топлива и метилового эфира. К таким топливам можно отнести метанол и этанол. Метанол в силу своей токсичности, малой теплотворности, высокой теплоты парообразования и, как следствие, низкого цетанового числа для практического использования малоинтересен. Этанол по своим физико-химическим показателям более предпочтителен при использовании в смесевом топливе, чем метанол.

При содержании 20 % этанола в смеси по сравнению с МЭРМ снижаются: теплотворность смеси, количество воздуха необходимого для сгорания 1 кг топлива, плотность, динамическая вязкость, коэффициент поверхностного натяжения и цетановое число соответственно на 2000 кДж/кг (5,7 %); 0,024 кмоль/кг (5,8 %); 18,43 кг/м³ (2,1 %); 0,002 Па·с (42,3 %), 0,0058 Н/м (23 %), 9,4 (22 %). При большей концентрации этанола в смеси уменьшение отмеченных параметров более существенно.

Для оценки влияния количества этанола в смеси с МЭРМ на показатели двигателя проведены расчетные исследования для режима С100 13-ступенчатого цикла ESC. Количество этанола в смеси изменялось в пределах 0–40 %.

Исследования проведены в два этапа. На первом регулировки системы топливоподачи принятые при работе на ДТ не изменяются. На втором этапе изменялась цикловая подача топлива.

В таблице 1 представлены результаты моделирования рабочего процесса, выполненные на первом этапе.

Таблица 1 – Индикаторные показатели дизеля при применении ДТ, МЭРМ и его смесей с этанолом (цикловая подача топлива 151 мм³)

Топливо	P_{is} , МПа	g_i , г/(кВт·ч)	P_z , МПа	T_{max} , К	dp/dv , МПа/град	α	η_i
ДТ	1,996	192,5	13,54	1731	0,5	1,7	0,44
МЭРМ	1,8	223,4	13,04	1590	0,483	1,86	0,432
5 %	1,793	223,2	13,08	1594	0,48	1,90	0,4383
10 %	1,767	225,2	13,05	1581	0,473	1,95	0,4405
20 %	1,703	231,2	12,8	1544	0,411	2,03	0,4414
30 %	1,646	236,8	12,63	1515	0,382	2,12	0,4436
40 %	1,562	247,0	12,07	1465	0,313	2,22	0,4383

На рисунке 1 показаны индикаторные диаграммы, полученные для ДТ, МЭРМ и его смесей, содержащих соответственно 5, 10 и 20 % этанола.

Анализ диаграмм показывает, что процесс тепловыделения начинается после ВМТ для всех исследуемых топлив. Наибольших значений давление

газов достигает при применении ДТ, максимальное давление газов по сравнению с МЭРМ на 0,5 МПа (3,8 %) выше. Наибольших значений достигает и максимальная интенсивность нарастания давления $dp/d\varphi$, при применении ДТ, этот показатель при использовании ДТ равен 0,5 МПа/град, а для МЭРМ – 0,475 МПа/град – снижение более 5 %.

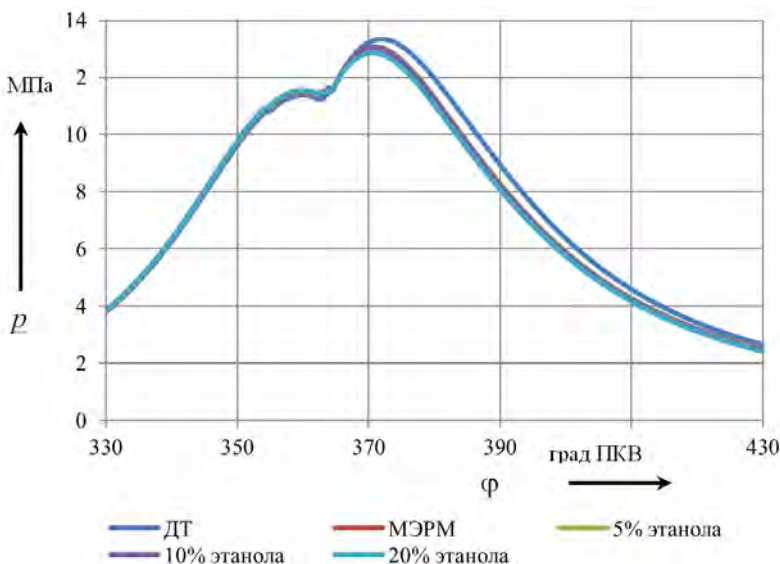


Рисунок 1 – Индикаторные диаграммы при работе дизеля на ДТ, МЭРМ и его смесях с этанолом

Использование смесей МЭРМ и этанола ведет к дальнейшему снижению максимальных значений давления и интенсивности нарастания давления. Так, например, по сравнению с использованием ДТ уменьшение максимального давления для смеси МЭРМ с содержанием 20 % этанола составляет 0,67 МПа (~5 %). Более существенно снижение максимальной интенсивности нарастания давления – ~0,1 МПа/град (23,7 %). При применении смеси, содержащей 40 % этанола, уменьшение максимального давления составляет 1,5 МПа (12 %), интенсивности нарастания давления составляет 0,19 МПа/град (60 %).

Зависимость температуры газов в цилиндре от угла поворота коленчатого вала показана на рисунке 2. Наибольших значений максимальная температура газов достигает при применении ДТ. Она выше по сравнению с использованием МЭРМ и его смесей с содержанием 5, 10, 20, 30 и 40 % этано-

ла соответственно на 150 (9,5 %), 155 (9,7 %), 163 (10,4 %), 200° (13 %), 225° (15 %) и 266° (18 %).

Особенности протекания индикаторных диаграмм и зависимостей температуры газов во многом определяются снижением теплотворности смеси, как в случае с использованием МЭРМ, так и при применении его смесей с различной концентрацией этанола. Кроме уменьшения теплотворности топлив происходит изменение физических свойств, определяющих мелкость распыливания топлива в цилиндре дизеля.

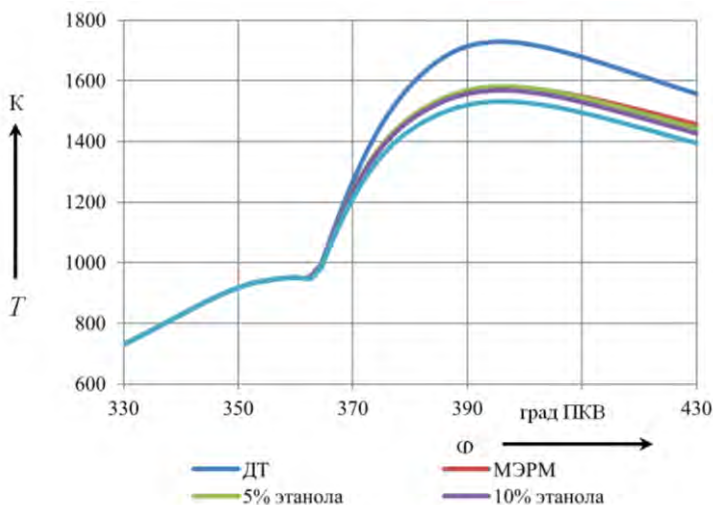


Рисунок 2 – Изменение температуры газов в цилиндре дизеля при его работе на ДТ, МЭРМ и его смесях с этанолом

Высокие значения динамической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения МЭРМ ведут к ухудшению мелкости распыливания топлива. В результате, несмотря на увеличение коэффициента избытка воздуха на 0,17 (10,4 %), продолжительность тепловыделения увеличивается. Это приводит к росту потерь теплоты от газов в стенки, что совместно со снижением теплотворности топлива уменьшает динамические показатели процесса сгорания и ухудшает мощностные и топливно-экономические показатели дизеля. Удельный индикаторный расход топлива (g_i) при переходе с ДТ на МЭРМ возрастает на 32 г/(кВт·ч) (16,6 %), а среднее индикаторное давление уменьшается на 0,2 МПа (11,4 %).

Применение смесей МЭРМ с этанолом сокращает продолжительности тепловыделения, что связано с улучшением мелкости распыливания топли-

ва и ростом коэффициента избытка воздуха. По сравнению с использованием МЭРМ увеличение коэффициента избытка воздуха составляет для смеси с содержанием 5 % этанола 0,04 (2,1 %), 10 % смеси – 0,08 (4,3 %), 20 % смеси – 0,17 (8,8 %), 30 % смеси – 0,26 (13,7 %), 40 % смеси – 0,31 (16,7 %).

Низкая теплотворность смесей обуславливает снижение мощности и увеличение удельного расхода топлива. В то же время повышение содержание этанола в смеси увеличивает индикаторный КПД (η_i). По сравнению МЭРМ индикаторный КПД возрастает, а среднее индикаторное давление снижается при применении смеси с содержанием 10 % этанола соответственно на 1,9 % и 0,033 МПа (1,8 %), для 20 % смеси эти показатели соответственно изменяются на 2,1 % и 0,096 МПа (5,6 %). Для МЭРМ в смеси, содержащей 30 и 40 %, уменьшение p_i соответственно составляет 0,15 (9 %) и 0,24 (15,2 %) МПа, η_i увеличивается менее чем на 1 %.

Повышение мощности дизеля может быть достигнуто путем увеличения цикловой подачи топлива.

Условием окончания роста цикловой подачи топлива на втором этапе исследований являлось снижение величины коэффициента избытка воздуха до уровня, соответствующего работе на ДТ. Это привело к повышению среднего индикаторного давления, однако, полученные значения оказались ниже давления, полученного при работе на ДТ (таблица 2). Наибольшие значения p_i по сравнению МЭРМ были достигнуты при использовании смесей, содержащих 10 и 20% этанола, увеличение составило 0,2 МПа (11 %) и 0,22 МПа (14,2 %) соответственно. Для 5 % смеси увеличение p_i составляет 0,18 МПа (9,3 %), для МЭРМ рост среднего индикаторного давления равен 0,15 МПа (7,7 %). Рост η_i по сравнению МЭРМ для его смесей с этанолом составляет для: 5 % смеси – 1,2 %; 10 % смеси – 1,6 %; 20 % смеси – 1,5 %. Повышение концентрации этанола в смеси более 20 % ведет к уменьшению величин p_i и η_i .

Таблица 2 – Индикаторные показатели дизеля при применении ДТ, МЭРМ и его смесей с этанолом, полученные при $\alpha = 1,69$

Топливо	p_i , МПа	g_i , г/(кВт·ч)	p_z , МПа	T_{max} , К	dp/dv , МПа/град	η_i
ДТ	1,996	192,5	13,5	1731	0,5	0,44
МЭРМ	1,951	224,5	13,4	1676	0,514	0,4295
5 %	1,975	224,8	13,5	1697	0,518	0,4347
10 %	1,983	227,2	13,6	1703	0,522	0,4364
20 %	1,981	234,1	13,4	1702	0,51	0,4354
30 %	1,961	243,7	13,5	1686	0,455	0,431
40 %	1,937	254,4	12,6	1670	0,425	0,4255

Для экспериментальных исследований влияния смесового топлива на процесс сгорания дизеля использовалась установка ИТ9-3М. Испытания проводились при степенях сжатия (16, 18, 20) при применении смесей содержащих по объему 10, 20, 30 и 40 % этанола. Индицирование проводилось с помощью многоканальной системы AVL IndiSmart 612, которая позволяет регистрировать и обрабатывать быстро изменяющиеся процессы в цилиндрах и системах двигателей внутреннего сгорания.

На исследуемых топливах установка работала устойчиво, кроме случаев применения смеси, содержащей 40% этанола на степенях сжатия 16 и 18 и на 30 % смеси при ϵ равной 16. При изменении количества этанола в смеси требовалась корректировка цикловой подачи топлива и угла опережения впрыскивания.

Добавка к МЭРМ этанола ведет к снижению величины p_z . Наибольшее отличие значений p_z получено при степени сжатия 16 (рисунок 3). Так при содержании в смеси 10 % этанола величина p_z становится ниже на 20 % при степени сжатия 16 и на 6,5 % при ϵ равном 20. Для смеси, содержащей 40 % разность давлений более значительна, при ϵ равном 16, 18 и 20 p_z соответственно на 40, 30 и 25 % ниже, чем при использовании МЭРМ.

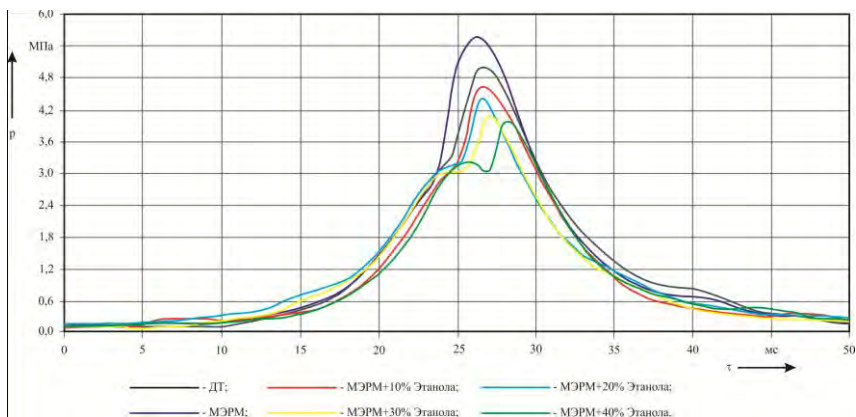


Рисунок 3 – Индикаторные диаграммы при работе на смесях МЭРМ с этанолом при степени сжатия 16

В сравнении с работой на ДТ величина p_z также оказывается ниже, за исключением работы на 10 % при степенях сжатия 18 и 20. В этом случае максимальное давление сгорания на 3–3,5 % превышает значения p_z , полученные при работе на ДТ.

Уменьшение максимального давления сгорания при использовании смесей МЭРМ и этанола происходит достаточно интенсивно. Это обуславливается более быстрым снижением по мере роста концентрации этанола в смеси теплотворности, плотности, кинематической вязкости и цетанового числа. В результате увеличиваются продолжительность топливopодачи и период задержки, что приводит к уменьшению количества теплоты, выделенной до прихода поршня в ВМТ.

Период задержки воспламенения смеси, содержащей 10 % этанола, примерно такой же, как и ДТ. По мере увеличения концентрации этанола в смеси этот показатель увеличивается, при степени сжатия 16 на 0,7 мс для 20 % и на 2,5 мс для 40 % смеси. Повышение степени сжатия несколько уменьшает эту разность давлений. Так при степени сжатия 20 величина θ меньше на 17 % для 10 % смеси и на 29 % для 40 %.

Средняя скорость нарастания давления, несмотря на увеличение периода задержки воспламенения оказывается ниже, чем при использовании ДТ. Это обусловлено как снижением теплотворности смеси, так и сгоранием значительной части топлива после ВМТ.

Величина $\Delta p/\Delta t$ при использовании 10 % смеси незначительно отличается от значений, полученных для ДТ при различных степенях сжатия. По мере роста концентрации этанола в смеси $\Delta p/\Delta t$ снижается с 0,83 МПа/мс для 10 % до 0,67 МПа/мс для 40 % при степени сжатия равной 16. Увеличение степени сжатия несколько уменьшает $\Delta p/\Delta t$ для 10 % смеси, но повышает для смесей с более высокими концентрациями этанола в смеси. Этот показатель для 10 % смеси при степени сжатия 18 составляет 0,82 МПа/мс, а для 40 % смеси 0,76 МПа/мс.

Результаты исследований показывают, что улучшение условий протекания рабочего процесса дизеля, работающего на метиловом эфире жирных кислот рапсового масла возможно при добавке в него до 30 % этанола.

Литература

1. Анализ рабочего процесса дизеля при работе на смесевом биотопливе / О.А. Ивашкевич, Ю.В. Григорьев, Г.М. Кухаренок, А.А. Зеленков, А.Н. Петрученко // Вестник БНТУ. – 2007. – № 6. – С. 71–76.
2. Кухаренок, Г.М. Особенности рабочего процесса дизеля при работе на смесевом биотопливе / Г.М. Кухаренок, А.Н. Петрученко / Многоцелевые гусеничные и колесные машины: актуальные проблемы и пути их решения: материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения М.Ф. Балжи. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С.113–118.