

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ В ТРАНСПОРТНОМ СЕКТОРЕ ЛИТВЫ СМЕСЕВЫХ СПИРТОВЫХ ТОПЛИВ

С.В. Лебедевас, Г.В. Лебедева, С.П. Кулманакс

*В статье рассмотрены материалы исследований по влиянию смесевых спиртовых биодизелей на показатели индикаторного процесса, топливной экономичности и эмиссии токсичных компонентов в отработавших газах (ОГ) дизеля.*

*Приведены результаты моторных испытаний дизеля 1С13/14 на смесях метилового эфира рапсового масла (РМЭ) и этанола (Э). Исследован характер изменения эмиссии токсичных компонентов в ОГ и показателей динамики индикаторного процесса на различных нагрузках дизеля, на основании чего выполнена оценка возможности альтернативного улучшения эксплуатационных показателей дизеля.*

*The results of the comparative complex experimentally-calculated researches of motor characteristics of EC standardized and alternative mixed spirit biodiesel fuels (mineral diesel fuel – rapeseed oil methyl ether – ethanol) are presented. The indices' analysis of alterations of fuel economy, emissions of toxic components in exhaust gases of one-cylinder compartment of 1С13/14 high-revolution tractor diesel engine, also parameters of its indicator process, when replacing mineral diesel fuel with biodiesel fuels, are carried out. A number of technological principles regarding perspective conversion of diesel engines which are operating in Lithuania into alternative spirit fuels are substantiated and the content of further research stages is defined.*

### ВВЕДЕНИЕ

В Литве проблематика применения биотоплив в транспортном секторе является одним из приоритетных научных направлений. Совместными исследованиями ученых Сельскохозяйственного университета (LŽŪU, г. Каунас) и Мореходного института Клайпедского университета (КУ ЈІ), в рамках выполнения проектов международной программы "EUREKA" (BIOWASTEFUEL – 3234, 2004-2006 гг. и E! 4018 "CAMELINA – BIOFUEL", 2008-2010 гг.), разработаны технологии производства и применения на транспортных средствах эксплуатируемых дизельной техники альтернативного топлива (биодизеля), производимых из отходов сельского хозяйства и животноводства [1,2].

Именно ограниченные сырьевые ресурсы производства рапсового масла в стране затрудняют в перспективе выполнение директив Парламента ЕС о поэтапной замене нефтяного дизельного топлива на его смеси со стандартизованным в ЕС метиловым эфиром рапсового масла (РМЭ) [3] и обуславливают необходимость поиска альтернативных сортов биодизеля.

В последнее время в качестве одного из них рассматриваются спиртовые смеси на основе биоэтанола с нефтяным дизтопливом [4,5,6]. Однако их применение в дизельном цикле затрудняют моторные характеристики спиртов, главным образом плохая самовоспламеняемость и ограниченная

растворимость этанола в нефтяном дизтопливе. Отмеченные недостатки на практике решаются применением в качестве растворителей этанола в дизтопливе высших спиртов, ацетатов, аминных углеводов, а также дорогостоящих присадок. В этом случае удается добиться близких моторных характеристик между дизтопливом и смесевыми биодизелями, однако, как правило, заметно увеличивается стоимость биодизелей и, в целом, снижается рентабельность их применения. Альтернативным активно разрабатываемым КУ ЈІ и LŽŪU решением являются трехкомпонентные смесевые биодизели: нефтяное дизтопливо - РМЭ – этанол (Д-РМЭ-Э). РМЭ, используемый в смеси в качестве растворителя, обеспечивает, кроме того, взаимную компенсацию с этанолом большинства важных моторных характеристик топлива: испарения, самовоспламенения, вязкости и др., а также существенное увеличение суммарной доли биоконпонента в смеси с минеральным дизелином.

В материале статьи приведены и анализируются результаты одного из этапов комплексных исследований Клайпедского университета, целью которых явилась оценка изменения показателей работы дизеля при замене стандартного дизтоплива на спиртовые смесевые биодизели и обоснование оптимальных пропорций РМЭ и Э. Моторные испытания выполнены совместно с

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ В ТРАНСПОРТНОМ СЕКТОРЕ ЛИТВЫ СМЕСЕВЫХ СПИРТОВЫХ ТОПЛИВ

учеными и на испытательной базе Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова (Россия, г. Барнаул) в рамках долгосрочного научно-технического сотрудничества между университетами. Положительно оценивая полученный опыт, последующими этапами натурных испытаний и математического моделирования на ЭВМ выполнены исследования характеристик топливоподачи и кинетики горения РМЭ-Э смесей - тепловыделения в цилиндре дизеля, а также готовятся моторные испытания с использованием 3-х компонентных рабочих смесей Д-РМЭ-Э.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПЫТАНИЙ

Объектом исследования явился одноцилиндровый отсек высокооборотного тракторного дизеля с объемно-пленочным смесеобразованием, и непосредственной впрыском топлива 1Ч13/14 (табл. 1) производства ОАО «Алтайский моторный завод» (Россия, г. Барнаул). Дизели данного типа сконструированы в 80-х годах прошлого столетия, широко применялись и до настоящего времени применяются на сельскохозяйственных машинах. По своим конструктивным параметрам и принципам организации индикаторного процесса они подобны значительной части морально и технически устаревшей дизельной техники транспортного сектора Литвы (средний возраст эксплуатируемых автомобильных, тракторных, железнодорожных, дизелей судовых назначений составляет от 15 до 25 лет [7,8]). На данном основании результаты проведенных исследований авторами используются для предварительной оценки ожидаемой эффективности перевода работы и других эксплуатируемых типов дизелей со стандартного дизтоплива на смесевые спиртовые биодизели.

Испытания выполнены при работе дизеля на скоростном режиме номинальной мощности  $1750 \text{ мин}^{-1}$  в диапазоне нагрузок  $P_{mi}$  от 0,25 МПа до 0,85 МПа. Испытаны нефтяное дизтопливо (Д) по ГОСТ 305-82, метиловый эфир рапсового масла (РМЭ), произведенный в Литве (UAB „Rapsoila“) по стандарту LST EN 14214, и его смеси с этиловым спиртом ретификатом – 96 % этанолом (Э) в объемных пропорциях от 10 % до 40 % этанола. Испытания проведены на аттестованном моторном стенде, оборудованном электрическим тормозом, автоматическим измерителем расхода топлива, датчиками регистрации давлений и температур в системах охлаждения и смазки дизеля.

Таблица 1 – Параметры испытанного дизеля 1Ч13/14

Наименование параметра	Погрешность регистрации
Крутящий момент	$\pm 0,5 \%$
Частота вращения коленчатого вала	$\pm 0,5 \%$
Среднее индикаторное давление	$\pm 1,0 \%$
Температура жидкостей в системе охлаждения и смазки	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
Давление жидкости в системе охлаждения и смазки	$\pm 1 \%$
Расход топлива	$\pm 0,5 \%$
Давление топлива в трубопроводе высокого давления	$\pm 1 \%$
Угол начала подачи топлива	$\pm 0,5^\circ \text{ п.к.в.}$
Угол конца подачи топлива	$\pm 0,5^\circ \text{ п.к.в.}$
Давление газов в цилиндре	$\pm 1 \%$
Содержание CO в выхлопных газах	$\pm 5 \%$
Содержание NOx в выхлопных газах	$\pm 5 \%$

Эмиссия токсичных компонентов выхлопных газов замерялась с помощью автоматического газового анализатора „Quintox 9106“, содержание твердых частиц в ОГ – дымомером типа Bosch. На всех исследованных режимах работы дизеля с помощью цифровой станции H-2000, комплекта датчиков давления и подъема иглы топливной форсунки осуществлялась регистрация давления топлива в трубопроводе высокого давления, газов в цилиндре дизеля, фактических углов начала и конца подачи топлива с осреднением полученных значений за 30-100 последовательных рабочих циклов дизеля. Погрешность замера параметров приведена в табл. 2.

Таблица 2 – Погрешность замера параметров

Наименование параметра	Значение
Диаметр цилиндра, мм	130
Ход поршня, мм	140
Степень сжатия	16
Среднее индикаторное давление на режиме номинальной мощности, МПа	0,85

Прод. табл.2

Частота вращения номинальная, мин <sup>-1</sup>	1750
Способ подачи топлива	Непосредственный
Способ смесеобразования	Объемно-пленочный
Размерность распылителя форсунки	4×0,25×150°

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ПОКАЗАТЕЛИ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ

Анализ показателей топливной экономичности дизеля выполнен с использованием удельного эффективного расхода топлива  $b_e$ , рассчитанного на основе фактически замеренного расхода топлива дизеля; индикаторного КПД  $\eta_i$ , а также эквивалентного удельного эффективного расхода топлива  $b_{e\text{ экв}}$ , пересчитанного с низшей теплоты сгорания испытуемого биодизеля на низшую теплоту сгорания минерального нефтяного дизтоплива по зависимости вида:

$$b_{e\text{ экв}} = b_e \frac{H_u^D}{H_u^P}, \quad (1)$$

где  $H_u$ ,  $H_u^P$  - низшая теплота сгорания соответственно испытуемого РМЭ-Э топлива и нефтяного дизтоплива.

Увеличение доли этанола в смеси биодизеля РМЭ-Э ввиду меньшей  $H_u$  этанола по сравнению с РМЭ (26,8 МДж/кг против ~ 37 МДж/кг) приводит к увеличению  $b_e$ , но не оказывает существенного влияния на характер его изменения по нагрузке дизеля (рис. 1):

- увеличение  $b_e$  на каждые 10 % повышения доли Э в РМЭ в среднем составило 3 %;

- наблюдается близкая степень относительного изменения  $b_e$  в исследованном диапазоне нагрузок  $P_{mi}$  для всех испытанных РМЭ-Э топлив, а также дизтоплива Д; так, при снижении  $P_{mi}$  с 0,85 МПа до 0,6 МПа величина  $b_e$  увеличивается на 16-18 %, при снижении  $P_{mi}$  до 0,5 МПа - увеличивается на 30-32 %; этот факт свидетельствует об отсутствии заметных изменений в характере протекания индикаторного процесса вызывающих необходимость конструктивной модернизации агрегатов топливной аппаратуры и изменения геометрии камеры сгорания для работы дизеля на смесевых спиртовых топливах РМЭ-Э;

- минимальные значения удельного эффективного расхода топлива  $b_e$  на кривых  $b_e=f(P_{mi})$  находятся за верхней границей ис-

следованного диапазона  $P_{mi}$ , т.е. на нагрузках, превышающих номинальные ( $P_{mi} \approx 0,83-0,85$  МПа для нефтяного дизтоплива Д); увеличение цикловых подач топлива, сопутствующее увеличению доли Э (массовых до 25 %, а объемных до 30 % сверх номинальных для Д) не является критичным для реализации эффективного впрыска биотоплив РМЭ-Э.

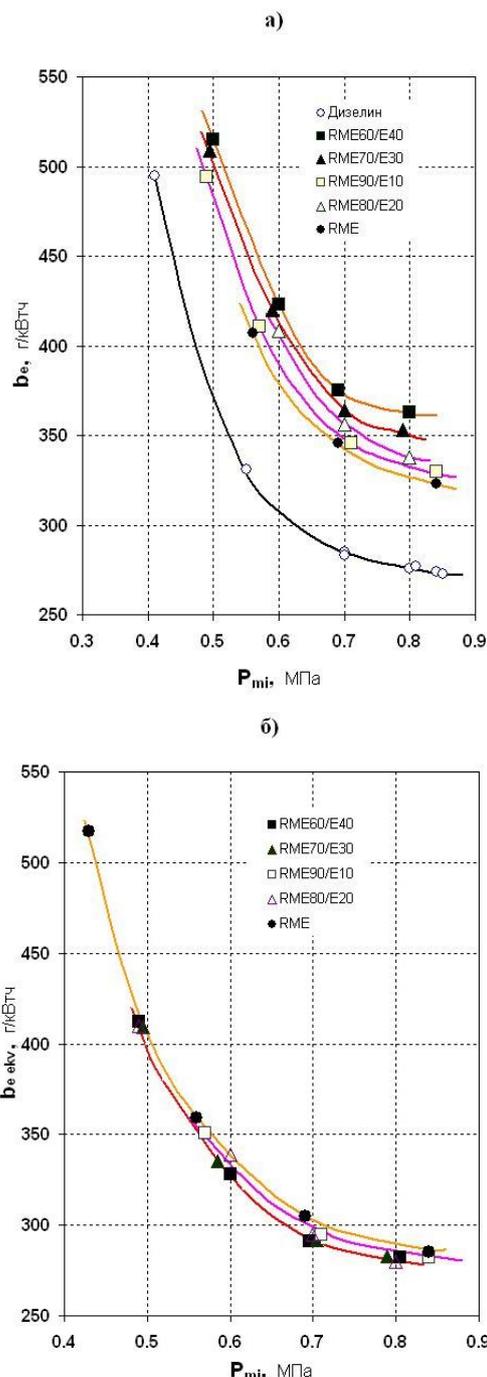


Рисунок 1 – Показатели топливной экономичности дизеля 1С13/14

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ В ТРАНСПОРТНОМ СЕКТОРЕ ЛИТВЫ СМЕСЕВЫХ СПИРТОВЫХ ТОПЛИВ

Принимая во внимание также опыт форсирования дизелей по величине среднего эффективного давления, в частности [9,10,11], можно констатировать, что конструкции золотниковых топливных насосов обладают достаточными запасами производительности для перевода эксплуатируемых парков дизелей на работу с нефтяного дизтоплива на биодизели Д-РМЭ, РМЭ-Э, Д-РМЭ-Э и др.

Величина  $b_{e\text{ ekv}}$  аналогично  $\eta_i$  дает интегральную оценку эффективности преобразования теплоты в механическую работу дизеля. Степень ее относительного изменения по сравнению с  $b_{e\text{ ekv}}^D$  базового топлива (нефтяного дизтоплива) является пропорциональной относительному изменению индикаторного кпд [12]:

$$\frac{\eta_i}{\eta_i^D} = \frac{b_{e\text{ ekv}}^D}{b_{e\text{ ekv}}} \quad (2)$$

Удобство практического применения эффективного показателя  $b_{e\text{ ekv}}$  по сравнению с индикаторным  $\eta_i$  объясняется тем, что не требует экспериментального определения механических потерь дизеля, либо непосредственного индцирования цилиндра дизеля для определения  $P_{mi}$ .

По мере увеличения доли этанола Э в смеси РМЭ-Э наблюдается устойчивая тенденция снижения  $b_{e\text{ ekv}}$  и повышения  $\eta_i$ . Увеличение доли Э до 40 % увеличивает  $\eta_i$  ~ на 2,5 % во всем исследованном диапазоне нагрузок  $P_{mi}$  (рис. 2). В среднем для испытанных смесевых биодизелинов РМЭ80Э20 – РМЭ60Э40 увеличение  $\eta_i$  составило ~ 2 % (см. пунктирная кривая на рис. 2). С учетом ограниченных возможностей растворения Э в дизелине Д возможность повышения  $\eta_i$  дизеля при применении смесевых спиртовых биодизелей Д-РМЭ-Э оценивается в 1-1,5 %.

Улучшение индикаторного кпд является несомненно важным фактором в пользу применения спиртовых биодизелей в транспортном секторе Литвы поскольку будет способствовать также и выполнению директивных нормативов Комиссии Парламента ЕС по повышению эффективности использования энергетических ресурсов.

### ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Анализ взаимосвязи интегральных показателей индикаторного процесса (коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , степени повышения давления при сгорании  $\lambda$ , максимального давления сгорания  $P_{max}$ , давления и температуры наддувочного воздуха и др.) позволяет

выявить резервы и наиболее эффективные, технически рентабельные направления повышения эффективности работы дизеля [13,14]. Вместе с тем данные о корректности такого анализа для сравнительных моторных исследований различных видов топлив на дизеле в литературных источниках отсутствуют. Такая предварительная оценка выполнена в рамках настоящих исследований.

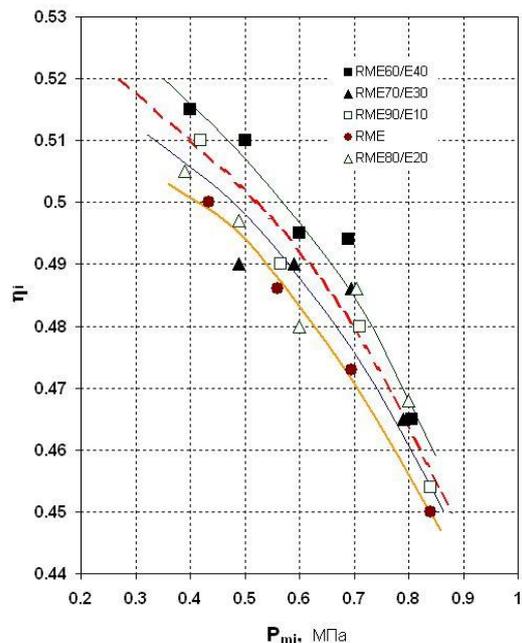


Рисунок 2 – Индикаторный КПД дизеля 1Ч13/14

Для объекта исследования дизеля без наддува 1Ч13/14 число анализируемых показателей индикаторного процесса сокращается до двух: коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и степени повышения давления  $\lambda$  либо максимального давления сгорания в цилиндре  $P_{max}$ . Коэффициент  $\alpha = G_{air}/(G_f \times L_0)$  оценивает воздухообеспечение цилиндра (индикаторного процесса) дизеля с учетом различий стехиометрической константы  $L_0$  испытанных топлив, вызванных увеличением доли Э в РМЭ-Э ( $G_{air}$ ,  $G_f$  - соответственно расход воздуха и топлива). Стехиометрическая константа этанола – количество воздуха необходимого для сгорания единицы массы топлива на 35 % меньше чем у РМЭ: соответственно 8,05 кг воздуха / кг топлива против 12,5 кг воздуха / кг топлива. Одновременно, ранее отмеченная меньшая теплоты сгорания этанола  $H_u$  (26,8 МДж/кг против 37 МДж/кг у РМЭ) обуславливает необходимость увеличения цикловых подач топлива для реализации равных мощностей. В результате противоположного по

характеру влияния на  $\alpha$  изменения  $H_u$  и  $L_0$  смесевых спиртовых топлив величина  $\alpha$  для всех исследованных пропорций РМЭ и Э, а также для нефтяного дизтоплива, остается практически неизменной (условие  $P_{mi} = idem$ ) (рис. 3).

Характер изменения максимального давления сгорания  $P_{max}$ , а для двигателя без наддува на равном основании  $\lambda$ , для биодизелей РМЭ-Э в сравнении с РМЭ и Д неоднозначен (см. рис. 3).

На режиме малых  $P_{mi}$  значения  $P_{max}$  ниже чем при использовании РМЭ и Д, на средних  $P_{mi} = 0,55-0,6$  МПа – практически одинаковы, а для номинальных  $P_{mi}$  – заметно выше. На режиме номинальной мощности дизеля  $P_{mi} = 0,83-0,85$  МПа величина  $P_{max}$  достигает 8,0 МПа, что на 1,0 МПа или ~ на 14 % выше, чем при работе дизеля на РМЭ и Д.

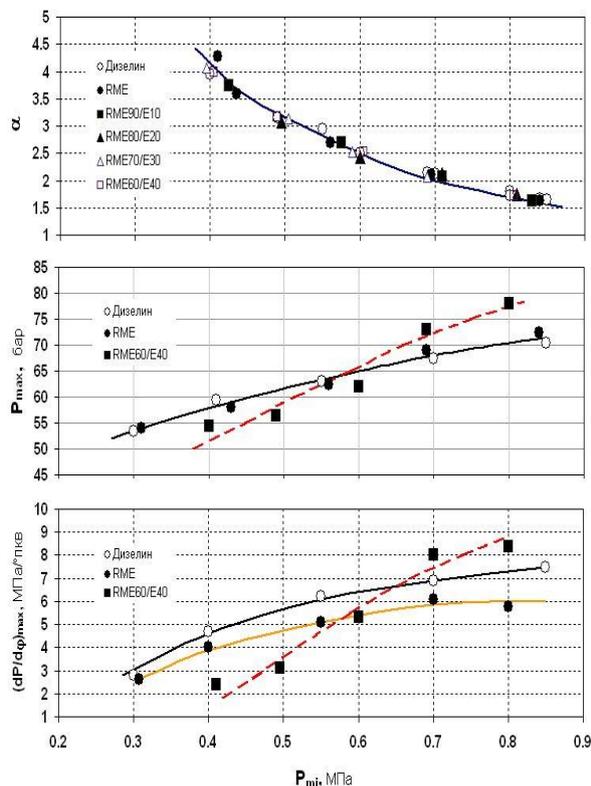


Рисунок 3 – Параметры индикаторного процесса дизеля 1413/14

Таким образом, при экспериментально установленном в ходе настоящих исследований  $\alpha = idem$  влияние  $\alpha$  на изменение  $\eta_i$  при использовании РМЭ-Э биодизелей исключается. В соответствии с [13] причиной увеличения  $\eta_i$  для смесевых топлив РМЭ-Э могут явиться различия  $P_{max}$  (или  $\lambda$ ). Для режимов номинальной мощности такое объяснение

было бы корректно, поскольку увеличению  $\lambda$  сопутствует рост  $\eta_i$ . Однако для средних и особенно малых нагрузок отмечена обратно пропорциональная зависимость между  $\lambda$  и  $\eta_i$  при переводе работы дизеля на спиртовые биодизели.

Аналогично неоднозначный результат получен авторами в ходе сравнительных испытаний дизелина Д, биодизелей Д-РМЭ и рапсового масла [7]. При экспериментально зафиксированном  $\lambda = idem$  для испытанных топлив не удалось установить единой функциональной зависимости  $\eta_i = f(\alpha)$ .

Таким образом, использование методов анализа индикаторного процесса с помощью интегральных параметров  $\alpha$ ,  $\lambda$  и др. в ходе сравнительных исследований различных видов топлив следует применять крайне осторожно, в сочетании с анализом характеристик подачи топлива и кинетики его горения в цилиндре. Именно последнее направление должно быть положено в основу разработки алгоритмов расчетного прогнозирования эксплуатационных показателей дизелей и, соответственно, типизированных технологических решений перевода работы дизелей на биодизелины.

Об изменении характеристик горения топлива и тепловыделения в цилиндре при работе на РМЭ-Э биодизелинах косвенно свидетельствует наблюдаемое снижение температуры отработавших газов (ОГ). Для  $P_{mi} = 0,85$  МПа оно составило порядка 25-30 °С. При примерно равном количестве введенной в цикл с топливом теплоты этот факт свидетельствует либо о более ранней фазе действительного впрыска спиртовых смесей РМЭ-Э по сравнению с Д и РМЭ, либо о возможной интенсификации горения, сокращения его продолжительности или о снижении температурных характеристик цикла.

Таким образом в рамках настоящей работы подтверждается целесообразность целевых исследований характеристик впрыска топлива и его горения в цилиндре.

Анализ изменения  $P_{max}$  в сочетании с максимальной жесткостью процесса  $(dP/d\phi)_{max}$  важен, кроме того, для оценки механических нагрузок на основные детали цилиндра-поршневой группы (ЦПГ). Характер изменения  $(dP/d\phi)_{max}$ , формирующий динамические нагрузки на детали ЦПГ, аналогичен  $P_{max}$  (рис. 3): для биодизеля РМЭ60Э40 увеличение  $(dP/d\phi)_{max}$  по сравнению с Д и РМЭ при  $P_{mi} = 0,8-0,85$  МПа достигло ~ 20 % и 50 % соответственно. Однако полученный ре-

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ В ТРАНСПОРТНОМ СЕКТОРЕ ЛИТВЫ СМЕСЕВЫХ СПИРТОВЫХ ТОПЛИВ

зультат не является критичным. Очевидно, что для используемых на практике биодизелей В30 (в которых суммарная доля биокомпонентов составляет 30 %) степень увеличения  $P_{max}$  и  $(dP/d\varphi)_{max}$  будет существенно ниже в связи с заметно меньшей долей Э в 3-х компонентном смесевом биодизеле Д-РМЭ-Э. Наблюдаемое уменьшение  $P_{max}$  и  $(dP/d\varphi)_{max}$  на режимах средних и малых нагрузок дизеля по сравнению с РМЭ и Д содержит определенный резерв улучшения эксплуатационных показателей топливной экономичности дизеля. Так, повышение динамики индикаторного процесса до уровня работы дизеля на Д за счет фазовых изменений топливоподачи (по примеру судовых дизелей) позволяет улучшить теплоиспользование на этих режимах и, в целом, снизить эксплуатационный расход топлива при работе транспортного средства на смесевых спиртовых топливах.

### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Выполнен анализ эмиссии токсичных компонентов, характеризующихся различным физическим механизмом образования в цилиндре дизеля: продуктов неполного окисления топлива на примере окиси углерода СО и наиболее токсичного компонента в ОГ дизеля - окислов азота  $NO_x$ . Характеристики эмиссии СО и  $NO_x$  рассмотрены в расчете на единицу массы испытуемого топлива ( $e'_{CO}$ ,  $e'_{NO_x}$ , г/кг топлива) и нормируемой стандартами единицы мощности дизеля ( $e_{CO}$ ,  $e_{NO_x}$ , г/(кВт×ч)) (рис. 4 и 5).

В обоих случаях наблюдается существенное влияние спиртовой компоненты топлива. Однако его характер по нагрузке дизеля в отношении СО и  $NO_x$  различен. Увеличение доли кислорода в составе этанола с 11 % для РМЭ и менее чем с 1 % для нефтяного дизтоплива Д до 36 % у Э способствует интенсивному снижению эмиссии СО в ОГ (рис. 4). Наибольший эффект снижения СО по мере увеличения доли Э в смесевом биодизеле РМЭ-Э достигнут на номинальных нагрузках: для  $P_{mi} = 0,8-0,85$  МПа в среднем на каждые 10 % увеличения доли Э значения  $e_{CO}$  и  $e'_{CO}$  снижаются на 7-8 %. Заметно больший положительный эффект получен по сравнению с дизтопливом: величина  $e'_{CO}$  для РМЭ60Э40 снизилась на 40-50 % во всем диапазоне нагрузок; в расчете на единицу мощности снижение  $e_{CO}$  при номинальном  $P_{mi}$  достигает 50 % и больше. На средних и малых нагрузках эффект уменьшения эмиссии СО снижается соответственно до 20 % и 10 %. Объяснение такой закономерности может служить ранее

отмеченное ухудшение динамики индикаторного процесса при работе дизеля на смесевых топливах РМЭ-Э по сравнению с Д.

Термический механизм образования  $NO_x$  в цилиндре дизеля обуславливает прямую взаимосвязь эмиссии окислов азота с показателем теплоиспользования в цилиндре  $\eta_i$  [15]. Поэтому в случае близких значений  $\eta_i$  эмиссия окислов азота в расчете на единицу массы топлива становится пропорциональной  $H_u$  топлива. Аналогичный результат в ходе настоящих исследований получен для режима номинального  $P_{mi}$ .

При соотношениях  $H_u$  испытуемых топлив Д, РМЭ и РМЭ-Э (использованы осредненные данные топлив РМЭ-Э - пунктирная линия на рис. 5) соответственно 42,5 МДж/кг : 37 МДж/кг : 33,4 МДж/кг или в относительных единицах 1,0 : 0,87 : 0,79 получены близкие соотношения  $e'_{NO_x}$  - 69 г/кг топлива : 62 г/кг топлива : 56 г/кг топлива или в относительном виде 1 : 0,89 : 0,81. В отличие от эмиссии СО на режиме малых и средних нагрузок эффект снижения  $e'_{NO_x}$  существенно больше по причине ухудшения динамических показателей цикла ( $\lambda$ ) и, соответственно, его температурных характеристик при работе на РМЭ-Э биодизелинах. Так, к примеру, при  $P_{mi} = 0,4$  МПа значение  $e'_{NO_x}$  с 60 г/кг минерального дизелина снижается до 35 г/кг РМЭ и 20 г/кг РМЭ-Э смесей.

В отношении эксплуатационных характеристик дизеля наиболее важен показатель эмиссии  $e_{NO_x}$  в расчете на единицу мощности дизеля. На режимах номинальных нагрузок существенные различия  $e_{NO_x}$  для испытанных топлив не наблюдаются; на частичных нагрузках  $e_{NO_x}$  спиртовых биодизелинов снижается на 50-55 % по сравнению с Д и на 40-45 % по сравнению с РМЭ (рис. 5). Причем влияние доли Э, начиная с 20 % и выше, в смесях РМЭ-Э мало ощутимо.

Наибольший эффект улучшения экологических показателей дизеля при переводе его работы с нефтяного дизтоплива на спиртосодержащие биодизели получен в отношении твердых частиц, содержащихся в отработавших газах (SM). По сравнению с Д использование РМЭ снижает количество твердых частиц в ОГ на 40% для режимов максимальных нагрузок дизеля (рис. 6). Уменьшение SM на средних и малых нагрузках достигает 30% и 10% соответственно. При этом характер изменения SM по нагрузке не меняется - наибольшая дымность ОГ наблюдается на режимах максимальных  $P_{mi}$ . Применение смесевых биотоплив РМЭ/Э не только заметно

снизило  $SM$ , но и изменило характер ее изменения по нагрузке. Начиная с 20% и выше доли этанола в смеси с РМЭ (РМЭ80/Э20) зависимость  $SM = f(P_{mi})$  получает выраженный экстремум дымности на режимах средних нагрузок (рис. 6). Объяснением данному факту может служить ранее отмеченный рост динамики индикаторного процесса ( $P_{max}$ ,  $\lambda$ ,

$(dP/d\varphi)_{max}$ ) при работе дизеля на спиртовых биотопливах РМЭ/Э (рис. 3) В среднем для исследованного диапазона нагрузок дизеля на каждые 10% увеличения доли Э в биодизеле снижение дымности отработавших газов составляет 20-25 %.

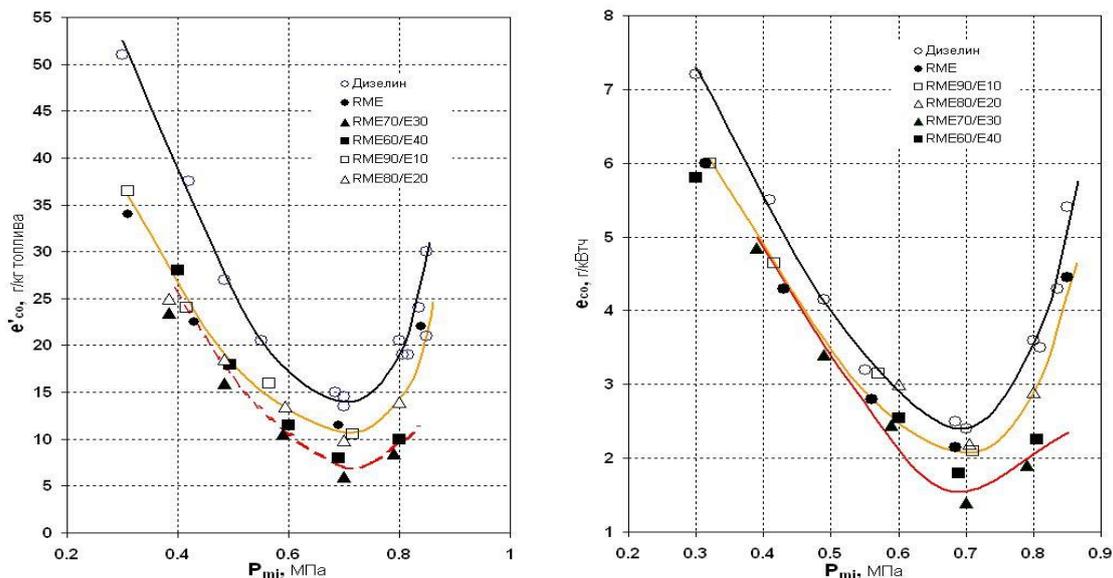


Рисунок 4 – Эмиссия CO в выхлопных газах дизеля 1C13/14

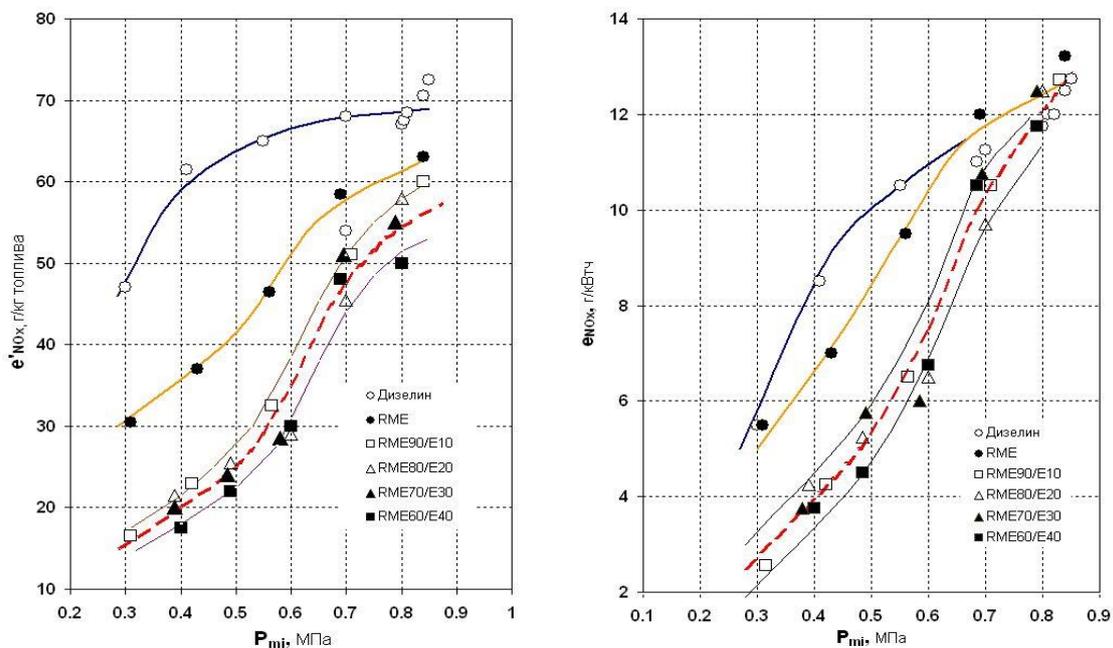


Рисунок 5 – Эмиссия NOx в выхлопных газах дизеля 1C13/14

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ В ТРАНСПОРТНОМ СЕКТОРЕ ЛИТВЫ СМЕСЕВЫХ СПИРТОВЫХ ТОПЛИВ

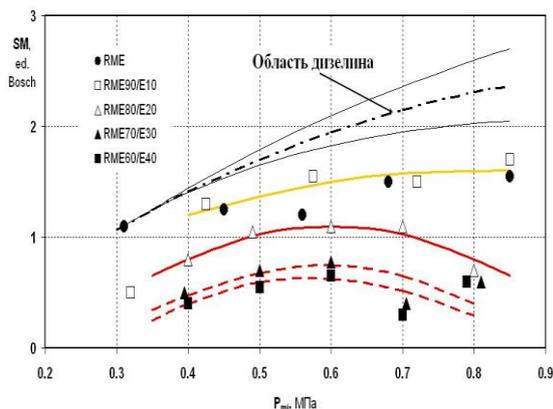


Рисунок 6 – Содержание твердых частиц в ОГ дизеля 1413/14

В данном случае  $SM$  не является лимитирующим фактором выполнения перерегулировки дизеля для работы на спиртовых биодизелях, учитывая существенное снижение дымности ОГ.

Подобное изменение позволяет избирательно регулировать степень снижения эмиссии  $CO$ ,  $NO_x$  и эксплуатационного расхода топлива в зависимости от предъявленных технических требований либо нормативных ограничений по параметрам дизеля.

### ВЫВОДЫ

Ограниченные сырьевые ресурсы для перспективного увеличения производства метилового эфира рапсового масла (РМЭ) в Литве обуславливают актуальность научных исследований по разработке технологий производства и эффективного применения в транспортном секторе новых сортов биодизелей, в том числе смесевых спиртовых топлив Д-РМЭ-Э.

Важным фактором в пользу применения спиртовых биодизелей является существенное улучшение экологических характеристик дизеля комплексно в отношении продуктов неполного окисления топлива ( $CO$ ,  $SM$ ) и наиболее токсичных компонентов в выхлопных газах – окислов азота  $NO_x$ . Снижение удельных показателей эмиссии  $e_{CO}$  и  $e_{NO_x}$  по сравнению с нефтяным дизтопливом на испытанном тракторном дизеле 1413/14 достигло 10-12 %, а содержания твердых частиц в ОГ – 20-25% на каждые 10 % увеличения доли этанола в биодизеле РМЭ/Э.

Повышение индикаторного кпд на 2-2,5 % при увеличении доли этанола до 40 % в биодизелине РМЭ-Э является одним из направлений реализации регламент-ированного Комиссией Парламента ЕС стратегического

**ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1-2 2009**

увеличение эффективности потребления энергетических ресурсов в странах ЕС.

Экспериментально установленная различная степень влияния спиртовой компоненты в биодизеле РМЭ-Э на эмиссию  $CO$  и  $NO_x$ , а также динамику индикаторного процесса ( $P_{max}, \lambda, (dP/d\varphi)_{max}$ ) служит основанием для реализации альтернативных технологий избирательного (в отношении топливной экономичности и эмиссии токсичных компонентов) улучшения эксплуатационных показателей дизелей при работе на спиртовых биодизелях Д-РМЭ-Э.

Исследованный характер изменения показателей дизеля при работе на спиртовых биодизелях РМЭ-Э при 20-30 % увеличение цикловых топливных подач по сравнению с минеральным дизелином Д свидетельствует об отсутствии нарушений в работе топливной аппаратуры, рабочем процессе и одновременно является одним из технологических обоснований возможности перевода эксплуатируемого парка дизельной техники на работу на смесевые спиртовые биодизелины Д-РМЭ-Э.

Направлением последующих этапов исследований явился анализ характеристик топливоподачи и тепловыделения в цилиндре при работе дизеля на РМЭ-Э биодизелях, а также эксплуатационных показателей дизелей при переводе их работы на 3-х компонентные смесевые топлива Д-РМЭ-Э.

Отличия элементарного химического состава спиртов (Э) по сравнению с Д и РМЭ (в части существенно большей доли кислорода) и их существенное влияние на кинетику горения спирта в дизельном цикле затрудняют применение методов анализа индикаторного процесса с помощью его интегральных показателей ( $\alpha, P_{max}, \lambda$ , и др.). Для прогнозирования эксплуатационных показателей дизелей при их переводе на работу на биодизели, а также распространения полученных результатов исследований на модели дизелей иных типажей, необходимы комплексные исследования характеристик топливоподачи и показатели кинетики горения биодизелей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lebedevas, S. Use of Waste Fats of Animal and Vegetable Origin for the Production of Biodiesel Fuel: Quality, Motor Properties, and Emissions of Harmful Components / S. Lebedevas, A. Vaicekauskas, G. Lebedeva, V. Makarevičienė, P. Janulis, K. Kazancev // Energy & Fuels. – 2006. – № 20. – P. 2274-2280.

2. Lebedevas, S. Change in Operational Characteristics of Diesel Engines Running on RME Biodiesel Fuel / S. Lebedevas, A. Vaicekauskas, G. Lebedeva, V. Makarevičienė, P. Janulis // *Energy & Fuels*. – 2007. – № 21. – P. 3010-3016.
3. Directive 2003/30/EC of the European Parliament and the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport / OJ L 123, 2003, – P. 42-46.
4. Pukalskas, S. Papildomai tiekiamo denatūruoto etilo spirito panaudojimo dyzeliniame variklyje pirminis tyrimas / S. Pukalskas, A. Butkus // *Transportas*. – V.: Technika, 2001. – P. 44-48.
5. Batshelor, S. E. A comparison of the energy balance of rape methyl ester and bioethanol / E. J. Booth, K. C. Walker / 9 th International rapeseed congress «Rapeseed today and tomorrow», 2005. – vol 4. – P. 1363.
6. Horne, R. E. Energy and carbon balances of biofuels production: biodiesel and bioethanol / R. E. Horne, N. D. Mortimer, M. A. Elsayed // *Proceedings. The International Fertiliser Society*. – 2003. – 3 April. – P. 1-56.
7. Lebedevas, S. Efektyvios dyzelių eksploatacijos RME biodyzelinu prielaidos. Biodyzelino degimo kinetikos tyrimai / S. Lebedevas, A. Vaicekauskas, P. Suškov // *Transport*. – V.: Technika. – 2007. – Nr. 2. – P. 126-133.
8. Smailys, V. Lietuvos jūrų transporto plėtotės perspektyvos ir aplinkosaugos problemos // *Lietuvos mokslas. Transportas*. – 1999. – № 22. – P. 354-411.
9. Wilde, K. MTU-396-Motoren mit Mischkreis - Ladeluftkühlung // *MTZ: Motortechn*. – 1990. – Bd. 51. – Hf. 5. – S. 220, 222.
10. Лебедев, С. В. Совершенствование показателей высокооборотных дизелей унифицированного типоразмера / С. В. Лебедев, Л. В. Нечаев. – Монография. – Барнаул: Академия Транспорта РФ, АлтГУ им. И.И. Ползунова, 1999. – 112 с.
11. Лебедев, С. В. Формирование конструктивного ряда поршней для типажа высокооборотных форсированных дизелей / С. В. Лебедев, Г. В. Лебедева, Д. Д. Матиевский, В. И. Решетов. – Монография. – Барнаул: Академия Транспорта РФ, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2003. - 89 с. – ISBN 5-7568-0345-9.
12. Lebedevas, S. Research of operational parameters of diesel engines running on RME biodiesel / S. Lebedevas, A. Vaicekauskas, G. Lebedeva, P. Janulis, V. Makarevichienė // *Transport*. – V.: Technika. – 2006. – № 4. – P. 260-268. – ISSN 1648-4142.
13. Иванченко Н. Н. Высокий наддув дизелей / Н. Н. Иванченко, О. Г. Красовский, С. С. Соколов – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1983. – 198 с.
14. Zinner K. Einige Ergebniss realer Keisprozessrechnungen uber die Beeinflussungsmoglichkeiten des Wirkungsgrades von Dieselmotoren / K. Zinner // *MTZ*. – 1970. – Bd.31. – Hf. 6. – S. 243-246.
15. Kruggel O. Progress in the combustion technology of high performance diesel engines toward reduction of exhaust emissions without reduction of operation economy. / J. Kruggel. – Baden-Wurttemberg Technology Conference. – Oslo, 1989. – 14 p.