

УДК 621.43:662.6

*В.Н. Бганцев, канд. техн. наук, В.П. Мараховский, инж., С.П. Хожасинов, инж.*

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЯ НА СМЕСЯХ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И БИОДОБАВКИ ИЗ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ МАСЛОЖИРОВОГО И СПИРТОВОГО ПРОИЗВОДСТВ

### Введение

В связи с непрерывно растущим потреблением нефтяных топлив всё большее внимание уделяется использованию альтернативных топлив, в том числе топлив биологического происхождения (ТБП), получаемых из возобновляемого сырья. На сегодня – это распространённые в странах Европейского союза, Южной Америки, США и других биоэтанол и биодизельное топливо для наиболее масштабных их потребителей – транспорта с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

ТБП используют в основном в виде добавок к минеральному топливу, причём процентное содержание его в последнем из года в год увеличивается [1,2]. Однако это сопровождается расширением посевов соответствующих сельскохозяйственных культур, являющихся сырьём для получения ТБП, что незамедлительно вызывает рост цен на продовольствие из-за сокращения производства продовольственных культур. И этот фактор в настоящее время способствует некоторому сдерживанию в продвижении ТБП на топливный рынок. Одним из путей интенсификации этого процесса является поиск новых сырьевых источников для ТБП. В частности в качестве таковых могут служить побочные продукты, получаемые при переработке растительного и животного сырья. В ОАО УкрНИИ Химмаш (г. Харь-

ков) получено ТБП из побочных продуктов масложирового и спиртового производства, которое может быть использовано как самостоятельное топливо, так и в качестве биодобавки (БД) к минеральному дизельному топливу (ДТ). Несмотря на относительно небольшое количество побочных продуктов масложирового производства (около 9500 т в год по Украине), они могут рассматриваться как возможные сырьевые источники для получения ТБП.

БД получают методом переэтерификации из отходов, образующихся при рафинировании подсолнечного масла, и сивушных масел при производстве этилового спирта. Отходы первого вида содержат 30–50 % жиров, остальное – жирные кислоты, в основном смесь олеиновой и линолевой кислот. Смесь сивушных масел, кроме этилового спирта, включает также набор высокомолекулярных спиртов. Данная БД получена в ходе реакции переэтерификации со следующим соотношением исходных компонентов: масложировые отходы – 60,4 % об., сивушные масла – 37,7 % об., катализатор (серная кислота) – 1,9 % об. БД достаточно хорошо растворяется в ДТ, полученная при этом смесь в обычных условиях не расслаивается. Изменение свойств смесевое топлива с 30 % содержанием БД в сравнении с дизельным можно оценить по результатам разгонки, приведенным в таблице 1.

Таблица 1. Результаты разгонки топлив (по данным УкрНИИ Химмаш)

Вид топлива	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	Температура при перегонке, °С				Цетановое число	Вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с
		Начало кипения	10%	50%	90%		
ДТ	0,834	182	221	269	337	46	4,16
Смесь: 70 % об. ДТ + 30% об. БД	0,844	170	218	286	346	> 60	5,00

### Цель и постановка задачи

Цель данной работы – определение показателей работы тракторного дизеля при использовании смесевых топлив на основе дизельного топлива и БД в

различных пропорциях и поиск оптимального содержания БД в смесевом топливе.

### Экспериментальные исследования

Сравнительные испытания проводились на экспериментальном стенде с тракторным дизелем Д21А,

имеющим непосредственный впрыск топлива и воздушное охлаждение.

В ходе испытаний измеряли все параметры работы дизеля, а также токсичность его отработавших газов (ОГ). Концентрации  $CO$ ,  $C_nH_m$ ,  $NO_x$  в ОГ опре-

деляли с помощью газоанализатора "Автотест – 02-03П" с погрешностью  $\pm 5\%$ .

Дизель испытывался на смесях с различным соотношением ДТ и БД. Отдельные физико-химические свойства исследуемых топлив представлены в таблице 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства смесевых биотоплив

Физико-химические свойства	Топливо						
	ДТ	БД	90% ДТ + 10% БД	80% ДТ + 20% БД	70% ДТ + 30% БД	50% ДТ + 50% БД	25% ДТ + 75% БД
Плотность при 20 °С, кг /м <sup>3</sup>	833	862	836	838	842	848	855
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	4,16	8,56	4,46	4,72	5,0	5,75	6,79
Теплота сгорания низшая, МДж /кг	42,5	36,9	41,92	41,34	40,77	39,64	38,24
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг	14,35	12,72	14,18	14,02	13,85	13,52	13,12

Все топливные смеси тщательно готовились к испытаниям, отстаивались и фильтровались. При проведении испытаний на каждом виде топлива снимали нагрузочную и скоростную характеристики дизеля. Полученные результаты представлены на рис. 1 - 5. Как видно из рис. 1 увеличение содержания БД в смесевом топливе во всех случаях приводит к росту часового расхода топлива  $G_T$ . Этому способствуют два фактора. Во-первых, все смесевые топлива имеют большую в сравнении с ДТ плотность. Второй фактор обусловлен меньшей теплотой сгорания смесевых топлив по отношению к ДТ. Наибольшее относительное увеличение  $G_T$  на режиме максимальной мощности отмечено для 50 % содержания БД в смесевом топливе. Оно составило 8,2 %. При работе дизеля на 100 % БД этот показатель был равен 3,1 %.

Изменение  $G_T$  по внешней скоростной характеристике, представленное на рис. 2, неоднозначно и в определенной мере характеризует качество сгорания смесевых топлив с различным содержанием БД.

При содержании БД равном 50 % отмечен наибольший рост  $G_T$  по сравнению с работой на ДТ по всей скоростной характеристике. Меньшие значения прироста  $G_T$  отмечены для смесевых топлив с 10 %, 20 %, 75 % и 100 % содержанием БД.

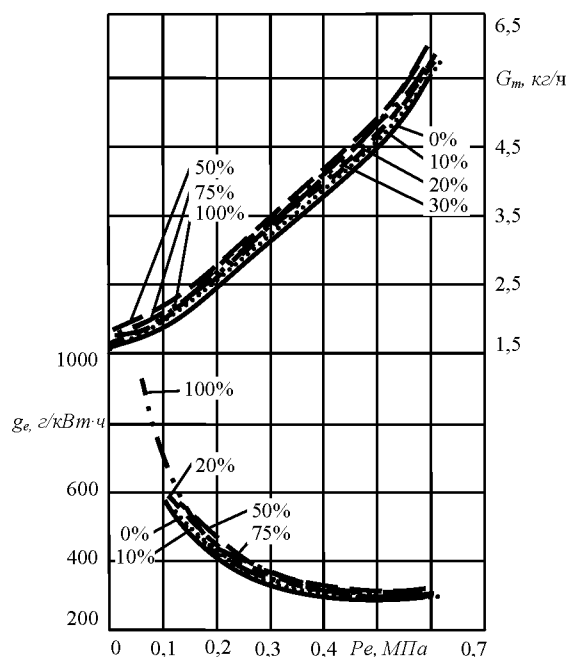


Рис. 1. Часовой и удельный эффективный расход топлива по нагрузочной характеристике

Отличается от прогнозируемого характер изменения мощности дизеля по внешней скоростной характеристике. При содержании БД 10 %, 20 % и 30 % была получена максимальная мощность дизеля большая, чем при работе на дизельном топливе.

Наибольший прирост – 3,4 % получен при 10 % содержании БД в смесевом топливе.

Меньшая в сравнении с ДТ теплота сгорания БД в основном способствовала росту удельного эффективного расхода смесевых топлив  $g_e$  при содержании БД выше 10 %, что видно из рис. 1. При 10 % содержании БД наблюдалось даже незначительное уменьшение  $g_e$  однако это снижение находилось в пределах погрешности измерений.

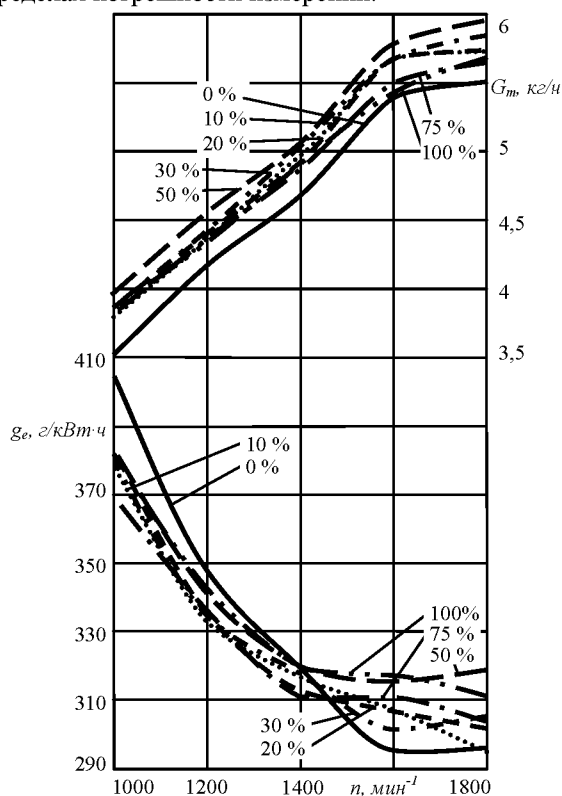


Рис. 2. Часовой и удельный эффективный расход топлива по внешней характеристике

Несколько необычный характер носит изменение  $g_e$  для испытуемых топлив по внешней скоростной характеристике. До частоты вращения  $\sim 1400$   $\text{мин}^{-1}$   $g_e$  при работе на всех смесевых топливах был ниже в сравнении с ДТ. После перехода через зону максимального крутящего момента и до номинальной частоты вращения  $g_e$  при любых содержаниях БД оставался выше по отношению к работе дизеля на ДТ. Такой характер изменения кривых  $g_e$  на рис.2, видимо, объясняется более эффективным сгоранием смесевых топлив при низких значениях коэффициента избытка воздуха.

Лучшее качество сгорания в сравнении с ДТ подтверждается также более высокими значениями эффективного КПД  $\eta_e$  при работе на любом из сме-

совых топлив по внешней скоростной характеристике, представленной на рис. 3. Наибольшее значение  $\eta_e - 0,314$  отмечено для случая работы дизеля на 100 % БД, что было на 2,8 % выше, чем на ДТ.

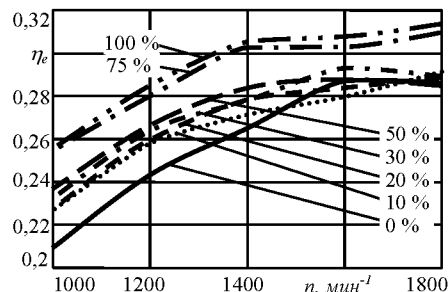


Рис. 3. Эффективный КПД по внешней скоростной характеристике

Присутствие БД в смесевом топливе оказывает заметное влияние на содержание основных токсических компонентов в отработавших газах (ОГ) дизеля. Это хорошо видно по изменению концентрации монооксида углерода  $\text{CO}$ , несгоревших углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_m$  и оксидов азота  $\text{NO}_x$  по внешней скоростной характеристике на рис. 4. Здесь на основных режимах при работе с любым смесевым топливом наблюдается снижение эмиссии  $\text{CO}$  по сравнению с работой на ДТ. Для случая со 100 % БД отмечено более, чем 2-х кратное уменьшение содержания  $\text{CO}$  в ОГ. Изменение концентрации  $\text{C}_n\text{H}_m$  в ОГ при работе на смесевых топливах имеет более сложный характер. Можно отметить, что область минимальных концентраций  $\text{C}_n\text{H}_m$  с увеличением содержания БД в смесевом топливе смещается в зону больших частот вращения по внешней скоростной характеристике. В зоне максимального крутящего момента ( $1400 - 1600$   $\text{мин}^{-1}$ ) концентрация  $\text{C}_n\text{H}_m$  в ОГ для всех смесевых топлив выше по сравнению с работой дизеля на ДТ.

На рис. 4 также представлено изменение концентрации  $\text{NO}_x$  в ОГ по внешней скоростной характеристике. Как видно минимальные значения для этих компонентов в ОГ отмечены для 30 % и 50 % содержания БД в смесевом топливе. Они более, чем в два раза ниже по сравнению с ДТ по всему полю характеристики.

Увеличение содержания БД в смесевом топливе выше 50 % привело к росту концентрации  $\text{NO}_x$ , причем на топливе с 75 % БД она стала выше, чем при работе на ДТ. На чистой БД уровень  $\text{NO}_x$  в ОГ по сравнению с ДТ несколько снизился.

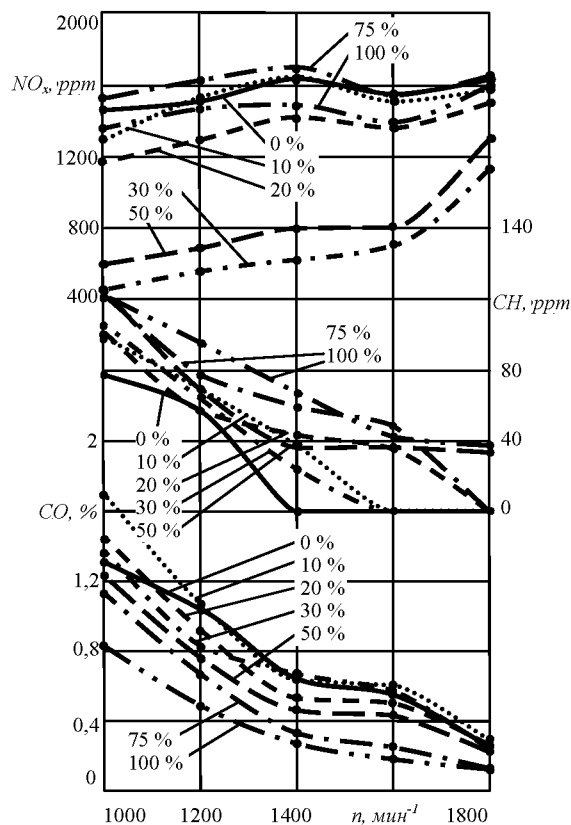


Рис. 4. Токсичность ОГ по внешней скоростной характеристике

Рост концентрации  $NO_x$  в ОГ при высоких содержаниях БД в смесевом топливе связан, в первую очередь, с ростом максимальных температур сгорания, что говорит о более высокой эффективности сгорания смесевых биотоплив.

Определенный интерес представляют результаты испытаний, полученные на мощности, соответствующей значению среднего эффективного давления  $p_e = 0,5$  МПа для всех исследуемых топлив. Здесь наибольшие значения такого важного показателя для транспортного дизеля как коэффициента приспособляемости  $K_n$  отмечены при содержании БД в смесевом топливе в пределах 25 – 35 %. Максимальное значение  $K_n = 1,101$  получено для 30 % содержания БД. В указанной выше области находятся также минимальные выбросы  $C_nH_m$ ,  $CO_2$  и  $NO_x$  и наблюдается некоторый рост эффективного КПД дизеля.

Вне выделенной области показатели работы дизеля ухудшаются при работе на всех смесевых биотопливах. Особенно это касается роста такого показателя токсичности как концентрация  $NO_x$  в ОГ.

В ходе испытаний с целью последующего проведения сравнительной оценки дымности дизеля на

разных топливах параллельно с измерениями токсичности ОГ проводились косвенные измерения уровня сажеобразования по методу фильтрования выхлопа [3].

Сущность данного метода состоит в сравнении фильтра, зачернённого сажевыми отложениями из ОГ, со стандартной тоновой шкалой. В промышленном дымомере степень зачернения бумажного фильтра оценивают путем измерения его оптической плотности с помощью фотоэлементов. В данном случае, в качестве тоновой шкалы использовалась шкала градаций серого, где граничными значениями являются степени черноты 0 и 100 %. В качестве сажевых фильтров при испытаниях использовались волокнистые фильтры марки АФА. Осредненные по всем режимам на каждом топливе степени черноты указанных фильтров приведены на рис.5.

Можно показать, что степень черноты каждого фильтра в определенной мере характеризует среднеинтегральную концентрацию сажи  $K_c$  в ОГ за все время испытаний дизеля на определенном виде топлива. Как видно из рис. 5 этот показатель ниже для всех смесевых топлив в сравнении с ДТ. Значение  $K_c$  при работе дизеля на чистой БД ниже на 33 % в сравнении с работой на ДТ. Значительное снижение дымности ОГ объясняется улучшением протекания процесса сгорания БД в первую очередь за счет наличия в её составе порядка 10 % кислорода, повышающего эффективность окисления БД. Однако, невзирая на снижение общего уровня сажеобразования при работе дизеля на смесевых биотопливах, во время разборки и осмотра деталей цилиндропоршневой группы после ~ 20 часов работы были обнаружены значительные количества нагара на стенках камеры сгорания и носике распылителя форсунки. Нагар оказался более легко удаляемым, чем нагар от ДТ.

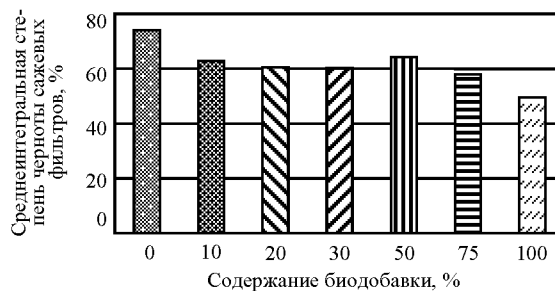


Рис. 5. Относительное среднеинтегральное содержание сажи в ОГ при работе на смесевых топливах

**Выводы**

Использование смесевых биодизельных топлив на основе предложенной биодобавки способствует заметному улучшению показателей токсичности ОГ дизеля. В большей мере это касается выбросов оксидов азота. Однако снижение их в ОГ наблюдается только при содержании БД в смесевом топливе не выше 75 %. С ростом содержания БД увеличивается удельный эффективный расход топлива и снижается максимальная мощность, развиваемая дизелем.

Отрицательной стороной использования смесевых биодизельных топлив является повышенное нагарообразование на поверхностях камеры сгорания и закоксовывание отверстий распылителей форсунок через относительно непродолжительный промежуток работы дизеля.

Комплексный анализ результатов испытаний позволил выделить область содержаний БД в смесе-

вом топливе в пределах 25 – 35 %. В этом диапазоне наблюдаются наилучшие показатели работы дизеля по эффективному КПД, суммарной токсичности ОГ и характеристике изменения крутящего момента.

Список литературы:

1. *Biofuel for Transportation: Adapt the motors to the fuel // Sustainable Energy News.* – 1994. – № 6. – P 10-11. 2. Железна Т.А. *Стан розвитку та перспективи виробництва і застосування рідких палив з біомаси / Т.А. Железна // Экотехнологии и ресурсосбережение.* – 2004. – Ч.2, № 3. – С. 3–8. 3. Варшавский И.Л. *Токсичность дизельной сажи и измерение сажеобразования дизельного выхлопа / И.Л. Варшавский, Ф.Ф. Мачульский // Сборник трудов ЛАНЭ.* – 1969. – С. 120–157.

УДК 629.5.03-08:621.431.36

*В.М. Горбов, канд. техн. наук, В.С. Мітенкова, асп.*

**КОМПЛЕКСНИЙ КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В СЕУ**

**Вступ**

При коливанні вартості нафтових палив, при загостренні проблемі раціонального використання природних ресурсів і захисту навколишнього середовища від забруднення перед судновою енергетикою виникають проблеми пошуку, впровадження і ефективного використання альтернативних палив (АП). Застосування АП має значні перспективи, особливо якщо врахувати наявний досвід експлуатації суднових енергетичних установок (СЕУ) різних типів суден [1]. При порівнянні різних варіантів СЕУ оцінку та остаточний вибір слід проводити вже на стадії концептуального (передескізного) проектування. В зв'язку із впровадженням на судах АП постає задача вибору типу палива для СЕУ.

Аналіз публікацій показав, що для порівняння різних варіантів СЕУ використовуються різні методи оцінки та критерії. В загальному випадку вибір кращих варіантів рекомендується проводити на основі співставлення величин витрат та корисного ефекту, оцінки економічної ефективності СЕУ [2]. В інших випадках оцінка ведеться з урахуванням основних показників енергетичної установки [3]. Оскільки АП

застосовуються на судах порівняно недавно і не досить широко, не завжди можливо здійснити повну математичну формалізацію задач оцінки ефективності їх використання.

Метою дослідження є розробка структури комплексного критерію ефективності (ККЕ) використання палив в СЕУ на стадії концептуального проектування з урахуванням існуючих методів системного аналізу та порівняння складних технічних систем; визначення особливостей застосування ККЕ стосовно зрідженого природного газу (ЗПГ) та біодизельного палива (БД).

**Розробка загальної структури ККЕ застосування АП в СЕУ**

Для вирішення задачі порівняння різних варіантів СЕУ, до якої можна віднести і вибір типу палива, доцільно використовувати метод комплексної оцінки. Даний метод ґрунтується на обчисленні узагальненої оцінки (з урахуванням оцінок за всіма критеріями) [4]. При визначенні ККЕ насамперед потрібно визначити, які показники СЕУ та яким чином будуть змінюватися при заміні нафтових палив АП. Тип обраного палива впливає переважно на такі показни-