тельного цикла, рассчитывались по общепринятой методике [3,4]. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4. Показатели дизеля Д-245.12C, оснащенного различными распылителями и работающего на различных топливах

Тип распылителя, применяемое топливо,	Показатели дизеля, г/(кВт⋅ч)				
Нормы выбросов токсичных компонентов	<b>g</b> е усл	ηе усл	enox	eco	еснх
Распылитель Motorpal, ДТ	247,20	0,3427	7,442	3,482	1,519
Распылитель Motorpal , 80 % ДТ + 20 % РМ	254,38	0,3410	7,159	3,814	0,965
Распылитель A3ПИ, 80 % ДТ + 20 % PM	253,11	0,3427	8,430	2,636	0,597
Требования норм EURO-2	-	-	7,0	4,0	1,1

Данные табл. 4 подтверждают возможность заметного улучшения показателей дизеля Д-245.12С при его оснащении предложенными распылителями. По сравнению с работой дизеля на ДТ со штатными распылителями Motorpal использование этих распылителей в дизеле, работающем на смесевом биотопливе, позволяет заметно снизить выбросы CO и CH<sub>x</sub> при сохранении неизменным эффективного КПД  $\eta_{e \ ycn}$  . Аналогичный эффект использования распылителей АЗПИ отмечен и по сравнению с работой дизеля на смесевом биотопливе с распылителями Motorpal. При этом замена распылителей Motorpal на распылители АЗПИ позволила повысить эффективный КПД двигателя  $\eta_{e \, \text{усл}}$  с 0,3410 до 0,3427 (на 0,5 %) и снизить выбросы eco c 3,814 до 2,636 г/(кВт·ч) (на 30,9 %) и выбросы echx. c 0,965 до 0.597 г/(кВт·ч) (на 38.1 %). Однако при этом увеличивается эмиссия  $e_{NOx}$ , с 7.159до 8,430 г/(кВт·ч) (на 17,8 %). При этом оба типа распылителей не обеспечивают требований норм EURO-2 по выбросам этого токсичного компонента. Для достижения требуемых показателей по выбросам NO<sub>х</sub> необходимо установку распылителей АЗПИ сочетать с реализацией других мероприятий, направленных на уменьшение эмиссии этого токсичного компонента (управление углом опережения впрыскивания топлива, охлаждение наддувочного воздуха, организация рециркуляции ОГ и др.).

### Литература:

- 1. Марков В.А., Коршунов Д.А., Девянин С.Н. Работа дизелей на растительных маслах // Грузовик &. 2006. № 7. С. 33-46.
- 2. Гайворонский А.И., Марков В.А., Илатовский Ю.В. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. 480 с.
- 3. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. 344 с.
- 4. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 376 с.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СМЕСЕВОГО БИОТОПЛИВА НА ОСНОВЕ РАПСОВОГО МАСЛА ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ

**Иващенко Н.А., Марков В.А., Зенин А.А., Коршунов Д.А., Ефанов А.А.** (МГТУ им. Н.Э. Баумана), **Девянин С.Н.** (МГАУ им. В.П. Горячкина)

В связи с ростом мировых цен на нефтепродукты и сокращением запасов нефти все более актуальными становятся работы, направленные на использование

в ДВС альтернативных топливах [1,2]. Актуальной является и необходимость снижения выбросов в атмосферу углекислого газа, относящегося к группе «парниковых газов». Поэтому интерес представляет использование в ДВС топлив из растительного сырья. Одним из наиболее перспективных альтернативных биотоплив является рапсовое масло (РМ) [3,4]. Ряд проблем, возникающих при работе дизельных двигателей на РМ (высокая вязкость РМ, закоксовывание распылителей форсунок и др.), устраняются при использовании смесей РМ с дизельным топливом.

Для оценки показателей работы дизелей, работающих на смесевых биотопливах и оптимизации их состава, проведены исследования дизеля Д-245.12С (4ЧН1/12,5) Минского моторного завода. При испытаниях дизеля Д-245.12С, проведенных на моторном стенде АМО «ЗиЛ», определялись показатели эффективности его работы при использовании четырех видов топлива: чистое ДТ и три вида смесевого биотоплива, состоящего из ДТ и РМ, смешанных в соотношениях 4:1, 3:2 и 2:3 (по объему). Токсичность отработавших газов (ОГ) оценивалась при работе двигателя на режимах 13-того испытательного цикла ЕСЕ R49 [5,6].

С использованием полученных экспериментальных данных проведены расчетные исследования, целью которых являлась оптимизация состава смесевого биотоплива на основе РМ для транспортного дизеля. При этом определялся состав биотоплива, обеспечивающий наилучшее сочетание показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля на режимах 13-ти ступенчатого испытательного цикла. Кроме того, рассчитывалось наилучшее сочетание этих показателей на каждом исследованном режиме и определялась характеристика, в соответствии с которой целесообразно изменять состав биотоплива в зависимости от режима работы дизеля.

Оптимизация проводилась с использованием метода свертки [6,7]. Данный метод позволяет многокритериальную задачу оптимизации состава смесевого биотоплива свести к однокритериальной задаче путем составления обобщенного критерия оптимальности в виде суммы частных критериев. В качестве этих критериев выбраны эффективный КПД двигателя и выбросы с ОГ нормируемых газообразных токсичных компонентов ОГ. Таким образом, при использовании данного метода оптимизации обобщенный критерий оптимальности  $J_o$  сформирован в виде суммы:

$$J_0 = \sum_{i=1}^k a_i J_i \,, \tag{1}$$

где  $J_i$  – частные критерии оптимальности;

 $a_i$  – весовые коэффициенты.

Частные критерии оптимальности рассчитывались по следующим зависимостям:

$$J_{\eta_e} = \frac{\eta_{e0}}{\eta_e}, \qquad J_{NOx} = \frac{e_{NOx}}{e_{NOx0}}, \qquad J_{CO} = \frac{e_{CO}}{e_{CO0}}, \qquad J_{CHx} = \frac{e_{CHx}}{e_{CHx0}},$$
 (2)

где  $\eta_e$  – эффективный КПД дизеля, работающего на данном топливе;

 $\eta_{e0}$  – эффективный КПД дизеля при работе на чистом ДТ;

 $e_{NOx}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CHx}$  — удельные массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода и углеводородов при работе дизеля на данном виде топлива, г/(кВт·ч);

 $e_{NOx0}$ ,  $e_{CO0}$ ,  $e_{CHx0}$  — удельные массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода и углеводородов при работе дизеля на чистом ДТ, г/(кВт·ч).

Весовые коэффициенты в выражении (1) показывают значимость того или иного частного критерия. В данном исследовании значимость частных критериев, характеризующих токсичность ОГ, определялась по соответствию исследуемого дизеля действующим нормам токсичности ОГ (EURO 2). В качестве базового варианта выбран дизель, работающим на чистом ДТ, а значения весовых коэффициентов на всех режимах 13-ступенчатого цикла были постоянными и независимыми вида используемого топлива. С целью реализации такого принципа выбора весовых коэффициентов предложено весовой коэффициент  $a_{\eta e}$  принять равным единице, а весовые коэффициенты  $a_{NOx}$ ,  $a_{CO}$ ,  $a_{CHx}$  определять в виде отношения действительной эмиссии токсичных компонентов ОГ к предельным величинам их эмиссии, лимитируемым нормами на токсичность ОГ, т.е.:

$$a_{NOx} = \frac{e_{NOx}}{e_{NOxnp}}, \qquad a_{CO} = \frac{e_{CO}}{e_{COnp}}, \qquad a_{CHx} = \frac{e_{CHx}}{e_{CHxnp}},$$
 (3)

где  $e_{NOx}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CHx}$  — удельные массовые выбросов оксидов азота, монооксида углерода и углеводородов при работе дизеля на чистом ДТ, г/(кВт·ч);  $e_{NOxnp}$ ,  $e_{COnp}$ ,  $e_{CHxnp}$  — предельные значения удельных массовых выбросов оксидов азота, монооксида углерода и углеводородов, лимитируемые нормами EURO-2, действующими в настоящее время в Российской Федерации, г/(кВт·ч). Полученные значения весовых коэффициентов приведены в табл.1.

Таблица 1. Весовые коэффициенты частных критериев оптимизации.

Весовой коэффициент	anox	aco	аснх
Значение весового коэффициента	1,063	0,871	1,381

При расчетных исследованиях определены интегральные на режимах 13-ти ступенчатого испытательного цикла удельные массовые выбросы токсичных компонентов ОГ. Выражение для расчета удельных выбросов оксидов азота имеет вид

$$e_{NOx} = \sum_{i=1}^{13} E_{NOxi} \cdot K_i / \sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i , \qquad (4)$$

где  $E_{NOxi}$  — массовый выброс оксидов азота на i-м режиме 13-ступенчатого испытательного цикла ЕСЕ R49, г/ч;

 $N_{ei}$  — мощность двигателя на i-м режиме по 13-ступенчатому испытательному циклу ЕСЕ R49, кВт;

 $K_i$  — коэффициент, отражающий долю времени i-го режима 13-ступенчатого испытательного цикла ЕСЕ R49.

Выбросы остальных токсичных компонентов ОГ рассчитывались по аналогичным выражениям. Условный среднеэксплуатационный удельный эффективный расход топлива определялся с использованием зависимости

$$g_{eyc\pi} = \sum_{i=1}^{13} G_{Ti} \cdot K_i / \sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i , \qquad (5)$$

где  $G_{\text{тi}}$  — часовой расход топлива на i-м режиме 13-ступенчатого испытательного цикла ЕСЕ R49, кг/ч.

Для оценки топливной экономичности дизеля использован безразмерный показатель – условный средний эффективный КПД  $\eta_{e\,cp}$ , характеризующий услов-

ный средний удельный эффективный расход топлива в эксплуатации  $g_{e\ cp\ ycn}$  и определяемый в виде

$$\eta_{e \text{ ycn}} = 3600 / (H_u \cdot g_{e \text{ ycn}}),$$
(6)

где  $H_u$  – низшая теплота сгорания топлива.

Представленная методика использована для определения состава смесевого биотоплива, обеспечивающего наилучшее сочетание показателей топливной экономичности и токсичности дизеля на режимах 13-ти ступенчатого испытательного цикла. Результаты расчета обобщенного критерия оптимальности  $J_o$  и параметры дизеля, работающего на различных топливах, приведены в табл. 2.

Результаты расчета свидетельствуют о том, что минимум критерия  $J_{\rm o}$  достигается при работе дизеля на смеси, содержащей 60 % ДТ и 40 % РМ. При таком составе смесевого топлива достигается наибольший условный средний эффективный КПД  $\eta_{\rm e\ cp}=0,344$ , наименьший выброс углеводородов  $e_{\rm CHx}=0,949\ r/(\kappa B {\rm T}\cdot {\rm q})$  и выполнение требования норм EURO-2 по всем газообразным токсичным компонентам, за исключение выбросов оксидов азота, оказавшихся равными  $e_{\rm NOx\ np}=7,031\ r/(\kappa B {\rm T}\cdot {\rm q})$ . Однако эти выбросы практически равны требуемым предельным выбросам  $e_{\rm NOx\ np}=7,0\ r/(\kappa B {\rm T}\cdot {\rm q})$  норм EURO-2. Их разница составляет 0,45 %, что меньше погрешности определения эмиссии  $NO_x$ .

Определение характеристики изменения состава биотоплива в зависимости от режима работы дизеля также проводилось с использованием метода свертки. При этом для каждого из режимов 13-ступенчатого испытательного цикла определялся вид топлива (чистое ДТ или смесевые биотоплива различного состава), обеспечивающий наилучшее сочетание экономических и экологических показателей двигателя, работающего на данном режиме.

Таблица 2. Параметры дизеля Д-245.12С и обобщенный критерий оптимальности при использовании различных типов топлива.

on in the first					
Тип топлива	<b>η</b> еусл	<i>e</i> nox, г/(кВт·ч)	<i>есо</i> , г/(кВт·ч)	<i>еснх</i> , г/(кВт·ч)	$J_0$
Чистое ДТ	0,343	7,442	3,482	1,519	4,315
Смесь ДТ и РМ (4:1)	0,341	7,159	3,814	0,965	3,858
Смесь ДТ и РМ (3:2)	0,344	7,031	3,880	0,949	3,835
Смесь ДТ и РМ (2:3)	0,336	6,597	3,772	1,075	3,883
Смесевое топливо переменного состава	0,332	6,797	3,013	0,975	3,644

Отличительная особенность расчета этой характеристики заключалась в том, что при определении частных критериев оптимальности по токсичным компонентам ОГ использовалось отношение не интегральных удельных массовых выбросов, как это было принято в выражениях (2), а массовых выбросов на каждом исследуемом режиме, т.е.:

$$J_{NOx} = \frac{E_{NOx}}{E_{NOx0}}, \qquad J_{CO} = \frac{E_{CO}}{E_{CO0}}, \qquad J_{CHx} = \frac{E_{CHx}}{E_{CHx0}},$$
 (7)

где  $E_{NOx}$ ,  $E_{CO}$ ,  $E_{CHx}$  — массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода и углеводородов при работе дизеля на данном виде топлива, г/ч;  $E_{NOx0}$ ,  $E_{CO0}$ ,  $E_{CHx0}$  — массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода и углеводородов при работе дизеля на чистом ДТ, г/ч.

Следует отметить, что при определении характеристики регулирования состава смесевого топлива в соответствии с изменением скоростного и нагрузочного режима двигателя значение частного критерия оптимальности, характеризующего эффективный КПД дизеля на режиме холостого хода, принималось равным нулю, то есть принималось что в выражениях (2) частный критерий  $J_{ne}$ =0.

Результаты расчетов представлены в табл. 2 и 3. Характеристика регулирования состава смесевого биотоплива (рис.1) получена методом линейной интерполяции показателей, полученных на режимах 13-ступенчатого цикла. При этом данные табл. 3 показывают, что на режиме холостого хода, оптимальной является работа на топливе, состоящем из 80 % ДТ и 20 % РМ. Однако необходимо учитывать, что на режиме холостого хода параметры дизеля недостаточно стабильны, из-за малой цикловой подачи смесевого топлива точное поддержание его требуемого состава затруднено, а также с целью упрощения характеристики регулирования состава топлива, принято, что на этом режиме оптимальной является работа на чистом ДТ.

Таблица 3. Распределение оптимальных составов смесевого топлива на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла (выделены минимальные значения критерия J<sub>0</sub>).

№ режима	$J_{0ДT}$	J <sub>0 4:1</sub>	$J_{03:2}$	$J_{02:3}$
1	3,315	3,106	3,376	3,817
2	4,315	4,721	4,853	5,240
3	4,315	4,521	4,637	4,568
4	4,315	4,346	4,424	4,343
5	4,315	4,693	4,588	5,426
6	4,315	3,795	3,810	3,679
7	3,315	3,106	3,376	3,817
8	4,315	3,821	3,687	3,140
9	4,315	3,672	3,618	3,061
10	4,315	3,921	3,423	3,206
11	4,315	3,676	3,290	3,378
12	4,315	3,607	3,323	3,950
13	3,315	3,106	3,376	3,817

Анализ данных табл.3 показывает, что наиболее целесообразным является применение смесевого топлива переменного состава (при этом значение критерия оптимальности  $J_0$  минимально). Реализация характеристики на рис. 1 позволяет значительно снизить вредные выбросы при незначительном снижении КПД двигателя (на 3,2 % по сравнению с работой на чистом ДТ).

Характерная особенность характеристики рис.1 заключается в увеличении концентрации РМ с ростом частоты вращения n и нагрузки  $M_e$ . Это объясняется тем, что при росте n и  $M_e$  улучшается качество распыливания топлива, его перемешивание с воздушным зарядом u, как следствие, повышается эффективность сгорания, что благоприятно влияет на показатели экономичности дизеля u приводит к снижению вредных выбросов. Достичь аналогичных результатов при меньших u и u u u не позволяет повышенная вязкость смесевого топлива.

Положительное влияние на показатели токсичности ОГ оказывает тот факт, что в состав РМ входит 10-12 % кислорода, участвующего в окислении углеводородов топлива.

В целом, проведенные исследования подтвердили, что применение смесевого топлива на основе РМ позволяет обеспечить экономию нефтяного топлива и снизить вредное воздействие ОГ на окружающую среду при незначительном снижении эффективности работы дизеля.

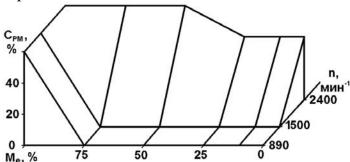


Рис.1. Распределение оптимальных составов смесевого топлива в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки.

#### Литература:

- 1. Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
- 2. Шкаликова В.Н., Патрахальцев Н.Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях. М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. 64 с.
- 3. Гайворонский А.И., Марков В.А., Илатовский Ю.В. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. 480 с.
- 4. Марков В.А., Коршунов Д.А., Девянин С.Н. Работа дизелей на растительных маслах // Грузовик &. 2006. № 7. С. 33-46.
- 5. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. 344 с.
- 6. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 376 с.
- 7. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Энергоатомиздат, 1987. 256 с.

# РЕШЕНИЕ ВОПРОСОВ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ С ОБЪЕМНО-ПЛЕНОЧНЫМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕМ НА ЧИСТОМ РАПСОВОМ МАСЛЕ

#### Матиевский Д.Д., Кулманаков С.П., Шашев А.В. (АлтГТУ им. Ползунова И.И.).

В большинстве развитых стран мира активно ведутся работы в области получения и применения альтернативных топлив, получаемых из семян растений масличных культур, в частности рапсового масла. Установлено, что для стран с умеренным климатом именно рапс, является наиболее рентабельным.

Для России исследования в этой области являются также актуальными по следующим основным причинам: во-первых, запасы нефти ограничены, во-вторых, сельские хозяйства заинтересованы в снижении энергетической зависимости от поставщиков нефтепродуктов. Кроме того, использование топлив на основе рапсо-