

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

В.А. Марков

vladimir.markov58@yandex.ru

Н.Д. Чайнов

В.В. Неверова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность темы статьи обусловлена необходимостью использования биотоплив в двигателях внутреннего сгорания. Перспективными являются биотоплива, получаемые из растительных масел. В сельском хозяйстве экономически целесообразно применение смесей нефтяных топлив с небольшой добавкой растительного масла. В качестве таких растительных масел рассмотрены рапсовое и подсолнечное масла. Представлены физико-химические свойства растительных масел и их смесей с дизельным топливом. Проведен анализ результатов экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С на нефтяном топливе и его смесях с добавками указанных растительных масел. Показана возможность улучшения экологических показателей дизеля при использовании этих смесевых биотоплив. Предложена методика оптимизации состава смесей растительных масел с нефтяным топливом, базирующаяся на определении обобщенного критерия оптимальности в виде суммы частных критериев оптимальности, которые характеризуют выбросы нормируемых токсичных компонентов отработавших газов дизелей. С использованием предложенной методики проведены оптимизационные расчеты и определен оптимальный состав смесевых биотоплив с добавками растительных масел. Разработана методика оценки экологической безопасности силовых установок с дизелями, которая учитывает концентрацию в отработавших газах дизеля полициклических ароматических углеводородов. Показано, что экологическую безопасность отработавших газов работающего на том или ином виде топлива дизеля можно оценивать только по выбросу бенз(а)пирена

Ключевые слова

Двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, нефтяное топливо, растительное масло, рапсовое масло, подсолнечное масло, смесевое биотопливо, токсичность отработавших газов, оптимизация

Поступила 09.01.2018

© Автор(ы), 2019

Использование биотоплив в двигателях внутреннего сгорания. Альтернативные моторные топлива находят все большее применение на транспорте и в сельском хозяйстве. В Европе к 2020 г. планируется перевести около четверти автомобильного парка на альтернативные топлива [1]. Необходимость широкого использования альтернативных топлив обусловлена истощением мировых запасов нефти, нарастающим дефицитом нефтепродуктов и повышением стоимости нефтяных моторных топлив. Еще одной причиной интенсивных поисков альтернативных энергоносителей являются ужесточающиеся требования к токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей [2].

Среди альтернативных моторных топлив наиболее привлекательными представляются топлива, получаемые из возобновляемых сырьевых ресурсов — биотоплива растительного происхождения [3, 4]. Биомасса зеленых растений суши составляет 2350 млрд т, а ежегодный ее прирост — 130 млрд т или $4,9 \cdot 10^{21}$ Дж энергии, что в 10 раз превышает ежегодный расход энергии человечеством. При этом российский агропромышленный комплекс, имея 11 % всей площади плодородных пахотных земель, ежегодно производит около 260 млн т сухого вещества и отходов сельскохозяйственного производства, в том числе 150 млн т — в растениеводстве. Государственная программа Российской Федерации по развитию сельского хозяйства и регулированию рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 гг. предусматривает дальнейшее развитие биотехнологий — доведение удельного веса отходов сельскохозяйственного производства, переработанного методами биотехнологий, к 2020 г. до 12 % [3].

Применительно к дизелям автотракторного типа в качестве перспективных энергоносителей рассматриваются топлива, производимые из растительных масел [4, 5]. Это объясняется простотой и экологичностью процесса получения растительных масел, их сравнительно невысокой стоимостью и приемлемой воспламеняемостью в условиях камеры сгорания (КС) дизеля. В сельскохозяйственном производстве предпочтительным представляется применение смесевых дизельных биотоплив с небольшими добавками растительных масел. В этом случае физико-химические свойства таких смесевых биотоплив незначительно отличаются от свойств нефтяного дизельного топлива (ДТ), и возможна работа дизелей на указанных биотопливах без существенных конструктивных изменений двигателей и их систем. В условиях России наиболее значимыми являются подсолнечное (ПМ) и рапсовое (РМ) масла.

Токсичность отработавших газов дизеля, работающего на растительных маслах и их смесях с дизельным топливом. Важнейшим фактором, способствующим более широкому использованию рассматриваемых смесевых дизельных биотоплив с добавками растительных масел, является улучшение показателей токсичности ОГ дизелей, работающих на этих топливах. Результаты проведенных исследований [2, 6] свидетельствуют о том, что даже небольшая добавка растительных масел и их производных (эфиров растительных масел) обеспечивает заметное улучшение показателей токсичности ОГ. Это подтверждается данными экспериментального исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) производства ОАО «УКХ «ММЗ» (Республика Беларусь) на смесях нефтяного ДТ с РМ и ПМ [6]. Такой дизель с турбонаддувом мощностью $N_e = 80$ кВт при $n = 2400$ мин⁻¹ выполнен рядным с числом цилиндров $i_d = 4$, рабочим объемом $iV_h = 4,32$ л, полуразделенной камерой сгорания и водяным охлаждением. Степень сжатия $\varepsilon = 16,0$, диаметр цилиндров $D = 110$ мм, ход поршня $S = 125$ мм.

На первом этапе дизель испытан на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) и 13-режимного цикла *ECE R49* при неизменном положении упора максимальной подачи топлива и постоянном угле опережения впрыскивания топлива (УОВТ), равном $\theta = 13^\circ$ поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (п.к.в. до ВМТ). Исследованы нефтяное ДТ марки «Л» по ГОСТ 305–82 и смеси ДТ с РМ с содержанием последнего 0...60 % (об.). Свойства этих топлив приведены в табл. 1, а результаты исследований — на рис. 1. На втором этапе дизель Д-245.12С испытан на смесях ДТ с ПМ с объемным содержанием последнего до 20 %. Методика испытаний была такой же, как и на первом этапе, но изменены некоторые регулировки дизеля. Свойства ДТ, ПМ и их смесей представлены в табл. 1, а результаты этих исследований — на рис. 2. Испытательный цикл *ECE R49* для оценки токсичности ОГ дизелей показан на рис. 3, а.

Таблица 1

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Свойство	ДТ	РМ	80 % ДТ + + 20 % РМ	60 % ДТ + + 40 % РМ	40 % ДТ + + 60 % РМ	95 % ДТ + + 5 % ПМ	90 % ДТ + + 10 % ПМ	80 % ДТ + + 20 % ПМ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Плотность при температуре 20 °С, кг/м ³	830,0	916,0	848,0	865,0	882,0	834,7	839,3	848,6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вязкость кинематическая при температуре 20 °С, мм ² /с	3,8	75,0	9,0	19,0	30,0	5,0	6,0	8,0
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42 500	37 300	41 500	40 400	39 400	42 100	41 900	41 400
Цетановое число	45	36	–	–	–	–	–	–
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,5	14,0	13,6	13,2	14,2	14,1	13,9
Содержание, % по массе:								
С	87,0	77,0	85,0	83,0	81,0	86,5	86,1	85,1
Н	12,6	12,0	12,5	12,4	12,2	12,5	12,5	12,4
О	0,4	11,0	2,5	4,6	6,8	1,0	1,4	2,5

Полученные результаты испытаний дизеля Д-245.12С (см. рис. 1, 2) показывают, что с ростом содержания РМ и ПМ в смесях с нефтяным ДТ выбросы токсичных компонентов изменяются. При этом зависимости выбросов различных токсичных компонентов ОГ от содержания масла в смесевых топливах имеют различный характер. В связи с этим целесообразно оптимизировать состав указанных смесей с учетом показателей токсичности ОГ дизеля.

Методика оптимизации состава смесевых биотоплив. Представленные результаты экспериментальных исследований показывают, что задача выбора оптимального состава смесевых биотоплив достаточно сложна и не имеет однозначного решения. Это обусловлено тем, что работа дизеля характеризуется комплексом показателей (критериев) токсичности ОГ. Требования к выбору оптимального по данным критериям состава топлива часто противоречат друг другу. В результате задача выбора оптимального состава смесевых биотоплив становится многокритериальной оптимизационной задачей [7–9].

Известны различные методики решения многокритериальных задач оптимизации, которые классифицируются в зависимости от числа оптимизируемых параметров, числа критериев оптимальности, особенностей их задания и определения степени их значимости. Применительно к задаче оптимизации состава смесевых топлив можно использовать мето-

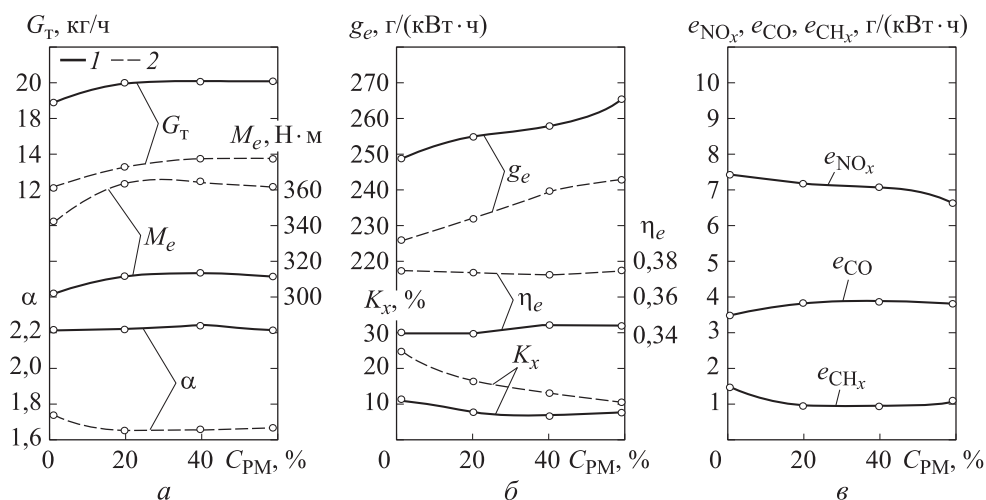


Рис. 1. Зависимости часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e , коэффициента избытка воздуха α (а), удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_x (б) на режимах ВСХ и зависимости удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NO_x} , монооксида углерода e_{CO} и несгоревших углеводородов e_{CH_x} с ОГ дизеля Д-245.12С в 13-режимном цикле ECE R49 (в) от содержания РМ в смеси с нефтяным ДТ C_{PM} :

1 — на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; 2 — на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

дики, приведенные в работах [8–10]. Они основаны на одном из наиболее эффективных методов оптимизации — методе свертки, при котором обобщенный критерий оптимальности формируется в виде суммы частных критериев. Предложенная методика оптимизации состава смесового биотоплива — смесей нефтяного ДТ с РМ и ПМ построена на составлении обобщенного аддитивного критерия оптимальности в виде суммы

$$J_{opt} = a_{NO_x} J_{NO_x} + a_{CO} J_{CO} + a_{CH_x} J_{CH_x} + a_{K_x} J_{K_x}, \quad (1)$$

где a_{NO_x} , a_{CO} , a_{CH_x} , a_{K_x} — весовые коэффициенты частных критериев оптимальности; J_{NO_x} , J_{CO} , J_{CH_x} , J_{K_x} — частные критерии оптимальности по выбросам нормируемых токсичных компонентов ОГ дизелей — оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , легких несгоревших углеводородов CH_x и сажи C (дымности ОГ). Указанные весовые коэффициенты выбраны с учетом данных, приведенных в работе [8], в которой токсикологическая значимость токсичных компонентов ОГ — NO_x , CO , CH_x , сажи (дымность ОГ) — оценивается как отношение 41,1 : 1 : 3,16 : 200. С учетом этих данных выражение (1) принимает вид

$$J_{opt} = 41,1 J_{NO_x} + 1,0 J_{CO} + 3,16 J_{CH_x} + 200 J_{K_x}. \quad (2)$$

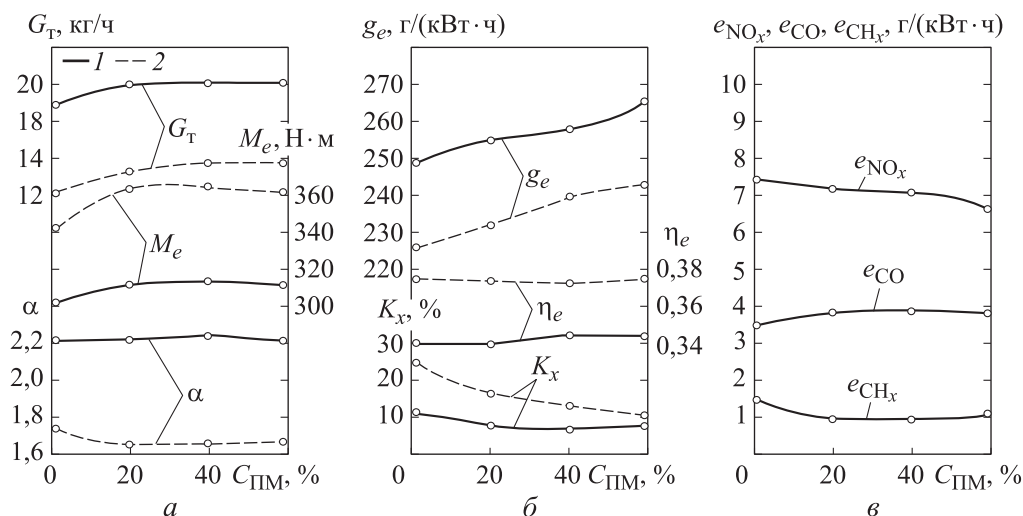


Рис. 2. Зависимости часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e , коэффициента избытка воздуха α (а), удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_x (б) на режимах ВСХ и зависимости удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NO_x} , монооксида углерода e_{CO} и несгоревших углеводородов e_{CH_x} с ОГ дизеля Д-245.12С в 13-режимном цикле ECE R49 (в) от содержания ПМ в смеси с нефтяным ДТ $C_{ПМ}$:

1 — на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; 2 — на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

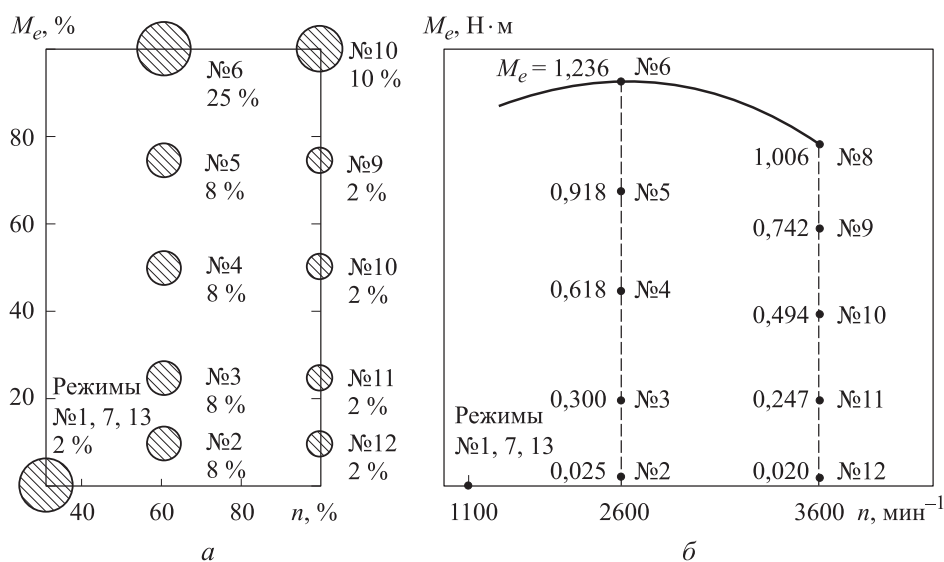


Рис. 3. Испытательные циклы для оценки токсичности ОГ дизелей:

а — 13-режимный цикл ECE R49; б — 13-режимный цикл JA 349; около точки каждого режима указаны номер режима и его доля K_i (в процентах) в общем объеме времени

Частные критерии оптимальности, входящие в выражения (1) и (2), предложено определять на каждом i -м режиме с использованием выражений

$$\begin{aligned} J_{\text{NO}_x} &= e_{\text{NO}_x i} / e_{\text{NO}_x \text{ ДТ}}; \quad J_{\text{CO}} = e_{\text{CO} i} / e_{\text{CO} \text{ ДТ}}; \\ J_{\text{CH}_x} &= e_{\text{CH}_x i} / e_{\text{CH}_x \text{ ДТ}}; \quad J_{K_x} = K_x i / K_x \text{ ДТ}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $e_{\text{NO}_x i}$, $e_{\text{CO} i}$, $e_{\text{CH}_x i}$, $K_x i$ — параметры дизеля, работающего на i -м топливе; $e_{\text{NO}_x \text{ ДТ}}$, $e_{\text{CO} \text{ ДТ}}$, $e_{\text{CH}_x \text{ ДТ}}$, $K_x \text{ ДТ}$ — параметры дизеля, работающего на нефтяном ДТ. В выражениях (1) и (2) использованы значения интегральных выбросов токсичных компонентов в 13-режимном цикле *ECE R49* и значения дымности ОГ на режиме максимального крутящего момента ВСХ. Обобщенный критерий оптимальности (2) также удобно использовать в относительном виде

$$\bar{J}_{\text{opt}} = J_{\text{opt} i} / J_{\text{opt} \text{ ДТ}}. \quad (4)$$

При решении оптимизационной задачи с использованием выражений (2) и (4) обобщенный критерий оптимальности J_{opt} минимизируется. Предложенная методика применена для оптимизации состава смесей нефтяного дизельного топлива с РМ и ПМ для дизеля типа Д-245.12С. При этом использованы экспериментальные данные, приведенные в работе [6] и на рис. 1, 2. Результаты вычислений значений частных критериев оптимальности по выражениям (3) и обобщенного критерия оптимальности по формулам (2) и (4) представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Оптимизация состава смесей нефтяного ДТ с растительными маслами
для дизеля типа Д-245.12С**

Топливо	e_{NO_x}	J_{NO_x}	e_{CO_x}	J_{CO_x}	e_{CH_x}	J_{CH_x}	K_x	J_{K_x}	J_{opt}	\bar{J}_{opt}
<i>Смесь нефтяного ДТ с РМ</i>										
ДТ	7,442	1,000	3,482	1,000	1,519	1,000	25,0	1,000	245,26	1,000
80 % ДТ + 20 % РМ	7,159	0,962	3,814	1,095	0,965	0,635	16,5	0,660	174,65	0,712
60 % ДТ + 40 % РМ	7,031	0,945	3,880	1,114	0,949	0,625	13,0	0,520	145,93	0,595
40 % ДТ + 60 % РМ	6,597	0,886	3,772	1,083	1,075	0,708	11,0	0,440	127,73	0,521
<i>Смесь нефтяного ДТ с ПМ</i>										
ДТ	6,630	1,000	2,210	1,000	0,580	1,000	20,0	1,000	245,26	1,000
95 % ДТ + 5 % ПМ	6,626	0,999	2,146	0,971	0,563	0,971	16,5	0,825	210,10	0,857
90 % ДТ + 10 % ПМ	6,649	1,003	2,091	0,946	0,580	1,000	15,0	0,750	195,33	0,796
80 % ДТ + 20 % ПМ	6,078	0,917	2,257	1,021	0,647	1,116	14,0	0,700	182,24	0,743

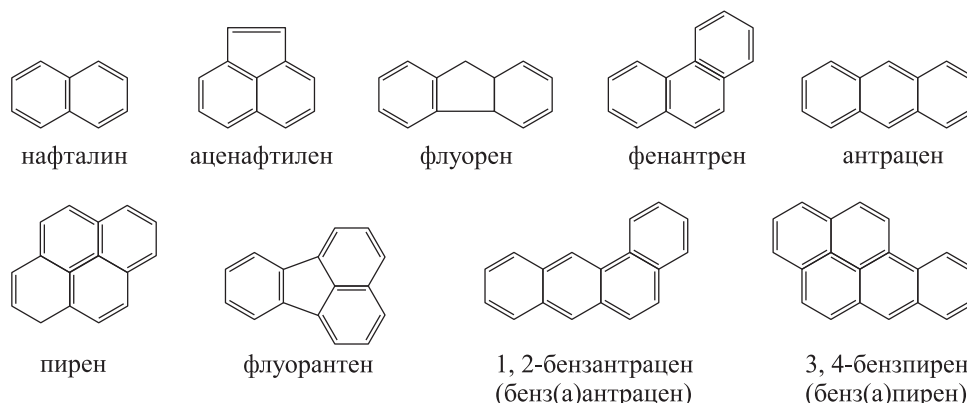
Результаты оптимизации свидетельствуют о том, что для дизеля типа Д-245.12С, работающего на исследованных смесях, при росте содержания рассматриваемых масел в смеси с нефтяным ДТ значения обобщенного критерия оптимальности \bar{J}_{opt} монотонно уменьшаются. Оптимальное в соответствии с выражениями (2) и (4) содержание растительных масел в указанных смесях соответствует максимальному (в рассматриваемом диапазоне) содержанию растительного масла.

Для смесей нефтяного ДТ с РМ минимум обобщенного критерия оптимальности ($\bar{J}_{opt} = 0,521$) приходится на содержание РМ в смеси с ДТ, равное $S_{PM} = 60$ %. Для смесей нефтяного ДТ с ПМ этот минимум ($\bar{J}_{opt} = 0,743$) отмечен при $S_{PM} = 20$ %. При работе на нефтяном ДТ обобщенный критерий $\bar{J}_{opt} = 1$.

Отметим тот факт, что при увеличении содержания растительного масла в смеси с нефтяным ДТ критерий оптимальности \bar{J}_{opt} постоянно снижается, но это наиболее заметно при небольшом содержании масла в смесевом биотопливе (см. табл. 2). В частности, при переводе дизеля Д-245.12С с нефтяного ДТ на смесь 95 % ДТ + 5 % ПМ обобщенный критерий оптимальности \bar{J}_{opt} снижается с 1,000 по 0,857, а дальнейший рост S_{PM} до 20 % приводит к уменьшению \bar{J}_{opt} лишь до 0,743. Это свидетельствует о том, что даже небольшая добавка растительного масла в нефтяное ДТ значительно улучшает показатели токсичности ОГ дизеля.

Методика оценки экологической безопасности силовых установок с дизелями. Следует отметить, что основной вклад в значения обобщенного критерия оптимальности \bar{J}_{opt} вносит дымность ОГ — содержание в них сажи. Значимость этого компонента ОГ значительно выше, чем у других нормируемых токсичных компонентов (NO_x , CO, CH_x). Высокая потенциальная опасность этих сажевых частиц обусловлена их способностью аккумулировать на своей поверхности многие канцерогены и мутагены, в основном полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), а также альдегиды, серосодержащие соли — сульфаты и аэрозоли несгоревших топлива и смазывающего масла [11].

Сажевые частицы имеют незначительные размеры (0,2...10 мкм), очень развитую поверхность (~ 90 м² на 1 г сажи), на которой адсорбируются ПАУ, что позволяет им проникать в органы дыхания человека и накапливаться в них. В ОГ дизелей обнаружено более 20 различных ПАУ. Основой ПАУ являются кольцевые структуры — циклопентановое кольцо и бензольное ядро. Структуры некоторых ПАУ приведены ниже [12–14]:



Исследованию концентрации ПАУ в ОГ дизелей посвящено большое число работ, в которых рассмотрена работа дизелей на нефтяных ДТ и альтернативных топливах, включая биотоплива [8, 12, 15]. Наибольшей массовой концентрацией в ОГ дизелей обладают следующие ПАУ: флуорантен; пирен; антрацен; фенантрен; флуорен. Это подтверждается результатами, полученными разными авторами (табл. 3).

Таблица 3

Концентрации (мкг/м³) ПАУ в ОГ дизелей по результатам, полученным разными авторами [12]

ПАУ	Israel	Mills	Lopes	Williams	Abbass	Wajsman
Флуорен	–	40	1,2	–	–	32,3
Фенантрен	–	100	1,0	74	59	89
Антрацен	–	10	0,1	–	–	13,2
Флуорантен	42	20	0,1	74	42	4,3
Пирен	39	10	0,07	78	30,8	14,24

В разработанной методике оптимизации состава смесевых биотоплив ПАУ оказываются учтенными лишь интегрально и косвенно — через токсикологическую значимость сажевых частиц. В работах [8, 12–14] указывается на серьезную опасность выбросов ПАУ с ОГ двигателей внутреннего сгорания для организма человека, поэтому при разработке методики оценки экологической безопасности силовых установок с дизелями необходимо напрямую учесть выбросы этих токсикологически значимых компонентов ОГ.

При разработке методики учитывалось, что индивидуальные углеводороды, присутствующие в ОГ дизелей, имеют различную токсикологическую значимость [8, 12]. Она может быть охарактеризована действующими предельно-допустимыми концентрациями (ПДК) токсичных веществ в воздухе

рабочей зоны. Следует отметить, что простейший ПАУ — нафталин $C_{10}H_8$ имеет такую же ПДК рабочей зоны, как и монооксид углерода (ПДК = ПДК $_{C_{10}H_8}$ = 20 мг/м³). Его токсикологическая значимость принята за базовую, а токсикологическая значимость других ПАУ приводится к нафталину. При таком подходе выражение для приведенной концентрации i -го ПАУ \bar{C}_i , учитывающей его относительную агрессивность по сравнению с нафталином, можно оценить по формуле

$$\bar{C}_i = \frac{\text{ПДК}_{C_{10}H_8}}{\text{ПДК}_i} C_i, \quad (5)$$

где ПДК $_{C_{10}H_8}$, ПДК $_i$ — предельно допустимые концентрации нафталина $C_{10}H_8$ и i -го ПАУ; C_i — концентрация последнего в ОГ. Просуммировав эти относительные приведенные концентрации отдельных ПАУ, получим показатель, характеризующий суммарную концентрацию ПАУ в ОГ дизеля с учетом их различной токсикологической значимости.

При сравнительной оценке экологических качеств различных топлив следует учитывать, что в отличие от нефтяных топлив растительные масла практически не содержат ПАУ, что и является основной причиной существенно меньшей концентрации ПАУ в ОГ дизелей, работающих на этих биотопливах. Для оценки эффективности использования предложенного показателя и сравнительной оценки экологической опасности ОГ дизеля, работающего на нефтяном ДТ и топливах, получаемых из растительных масел, использованы данные работы [15]. В ней приведены результаты испытаний одноцилиндрового дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива, степенью сжатия $\varepsilon = 19$ и УОВТ, равным $\theta = 30^\circ$ п.к.в. до ВМТ. Двигатель исследовался в 13-режимном испытательном цикле JA 349 (рис. 3, б). Дизель работал на нефтяном ДТ, рафинированном ПМ, а также на смеси этих топлив в пропорции 50 % ДТ + 50 % ПМ (по объему). Физико-химические свойства исследуемых топлив приведены ниже. Результаты измерений общей концентрации ПАУ в ОГ дизеля в 13-режимном цикле на различных топливах приведены в табл. 4, а интегральная концентрация в ОГ индивидуальных ПАУ — в табл. 5. По данным, представленным в табл. 5, можно сделать вывод, что максимальная концентрация ПАУ в ОГ наблюдалась на режимах холостого хода (режимы № 1, 7 и 13) с недостаточной интенсивностью движения воздушного заряда, плохим качеством распыливания топлива и смесеобразования, относительно низкими температурой и давлением сгорания. Отсутствие ПАУ в исходном ПМ приводит к тому, что и в ОГ работающего на нем дизеля концентрация этих ПАУ незначительна.

Физико-химические свойства исследуемых топлив

	ДТ	ПМ
Плотность при температуре 20 °С, кг/м ³	850	920
Вязкость кинематическая при температуре 38 °С, мм ² /с	2,4	29,4
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,7	37,0
Цетановое число	45,4	39,5
Содержание, % по массе:		
С	86,9	12,5
Н	0,67	8,2
О	11,6	10,2

Таблица 4

Общая концентрация, мкг/г, ПАУ в ОГ дизеля, работающего в 13-режимном цикле на различных топливах

Номер режима 13-режимного цикла	ДТ	50 % ДТ + 50 % ПМ	ПМ
1	4,9038	3,3627	1,2853
2	–	–	–
3	1,5973	0,4925	0,2715
4	0,2385	0,0606	0,0487
5	0,3674	0,3526	0,1090
6	1,8642	0,2359	0,2006
7	4,9038	3,3627	1,2853
8	0,8074	0,0601	–
9	0,2219	0,0807	–
10	0,3784	0,2431	0,0136
11	2,2169	1,0157	–
12	3,1651	1,9711	0,2170
13	4,9038	3,3627	1,2853

Таблица 5

Интегральная концентрация, мкг/г, индивидуальных ПАУ в ОГ дизеля, работающего в 13-режимном цикле на различных топливах

ПАУ	ДТ	50 % ДТ + 50 % ПМ	ПМ
Нафталин C ₁₀ H ₈	0,0751	0,0247	0,0112
Аценафтилен C ₁₂ H ₈	0,0852	0,0644	0,0178
Фенантрен C ₁₄ H ₁₀	1,4391	1,2811	0,9215
Антрацен C ₁₄ H ₁₀	0,2462	0,0004	0
Флуорантен C ₁₆ H ₁₀	4,0489	2,3988	0,8320
Пирен C ₁₆ H ₁₀	1,4261	0,9799	0,9487
Бенз(а)антрацен C ₁₈ H ₁₂	1,1607	0,0036	0,0002
Бенз(а)пирен C ₂₀ H ₁₂	0,0757	0,0509	0,0052

С использованием описанной методики и данных, приведенных в табл. 5, проведена оценка экологической безопасности силовой установки с дизелем, работающим на нефтяном ДТ, ПМ и на смеси этих топлив в пропорции 50 : 50 %. При этом следует отметить, что среди индивидуальных ПАУ, содержащихся в ОГ дизеля, ПДК рабочей зоны установлены лишь для нафталина, фенантрена, пирена и бенз(а)пирена. Приведенные к нафталину концентрации указанных индивидуальных ПАУ, определенные по формуле (5), сведены в табл. 6. После суммирования этих приведенных концентраций получена суммарная приведенная концентрация ПАУ $\sum \bar{C}_i$, являющаяся критерием, характеризующим экологическую безопасность ОГ дизеля, работающего на различных топливах.

Приведенные в табл. 6 данные свидетельствуют о том, что наибольший суммарный показатель экологической безопасности $\sum \bar{C}_i$ отмечен при работе дизеля на нефтяном ДТ, а наименьший — при работе на ПМ. В первом случае этот показатель равен 11080,6 мкг/г топлива, а во втором — 1349,1 мкг/г топлива (графически полученные значения суммарной приведенной концентрации ПАУ $\sum \bar{C}_i$ в ОГ исследуемого дизеля представлены на рис. 4, а). Следует отметить, что наибольшее влияние на суммарный показатель $\sum \bar{C}_i$ оказывает выброс бенз(а)пирена $C_{20}H_{12}$. Поэтому экологическую безопасность ОГ дизеля, работающего на том или ином виде топлива, можно оценивать только по выбросу бенз(а)пирена.

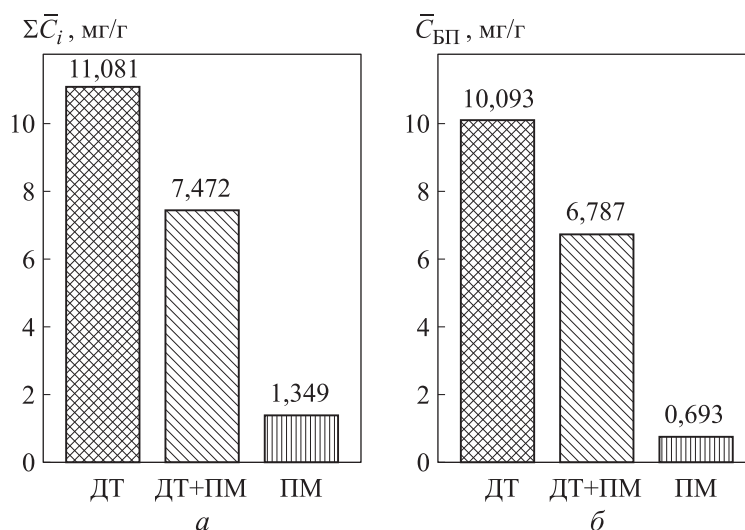


Рис. 4. Суммарная приведенная концентрация ПАУ $\sum \bar{C}_i$ (а) и показатель экологической безопасности по бенз(а)пирену $\bar{C}_{БП}$ (б) при работе дизеля на ДТ, ПМ и смеси 50 % ДТ + 50 % ПМ в 13-режимном цикле JA 349

Таблица 6

**Концентрация индивидуальных ПАУ в ОГ дизеля, работающего на различных топливах,
и экологические характеристики ПАУ и ОГ дизеля**

ПАУ	ПДК рабочей зоны, мг/м	Отношение ПДК/ ПДК _{С₁₀Н₈}	Концентрации ПАУ в ОГ С _i , мкг/г			Приведенная концентрация \bar{C}_i , рассчитанная по формуле (5), мкг/г		
			ДТ	50 % ДТ + 50 % ПМ	ПМ	ДТ	50 % ДТ + 50 % ПМ	ПМ
Нафталин С ₁₀ Н ₈	20,0	1	0,0751	0,0247	0,0112	0,0751	0,0247	0,0112
Ацефтаилен С ₁₂ Н ₈	-	-	0,0852	0,0644	0,0178	-	-	-
Фенантрен С ₁₄ Н ₁₀	0,8	25	1,4391	1,2811	0,9215	36,0	32,0	23,0
Антрацен С ₁₄ Н ₁₀	-	-	0,2462	0,0004	0	-	-	-
Флуорантен С ₁₆ Н ₁₀	-	-	4,0489	2,3988	0,8320	-	-	-
Пирен С ₁₆ Н ₁₀	0,03	667	1,4261	0,9799	0,9487	951,2	653,6	632,8
Бенз(а)антрацен С ₁₈ Н ₁₂	-	-	1,1607	0,0036	0,0002	-	-	-
Бенз(а)пирен С ₂₀ Н ₁₂	0,00015	133333	0,0757	0,0509	0,0052	10093,3	6786,6	693,3
Суммарная приведенная концентрация ПАУ $\sum \bar{C}_i$, мкг/г	-	-	-	-	-	11080,6	7472,2	1349,1
Показатель экологической безопасности по бенз(а)пирену $\bar{C}_{БП}$, мкг/г	-	-	-	-	-	10093,3	6786,6	693,3

Приведенные в табл. 6 значения показателя экологической безопасности по бенз(а)пирену (его приведенные концентрации $\bar{C}_{БП}$ в ОГ) для дизеля также свидетельствуют о преимуществах использования биотоплив, получаемых из растительных масел: для нефтяного ДТ этот показатель равен 10093,3 мкг/г топлива, а для ПМ — 693,3 мкг/г топлива (графически полученные значения приведенной концентрации бенз(а)пирена $\bar{C}_{БП}$ в ОГ дизеля представлены на рис. 4, б).

Заключение. Проведенные исследования позволяют сделать вывод об эффективности применения смесей нефтяного ДТ с растительными маслами в дизелях без изменения их конструкции. В первую очередь — это дизели сельскохозяйственных машин, в которых могут применяться смеси нефтяного ДТ с техническими, низкосортными, просроченными маслами, а также фритюрными маслами. Проведенный анализ результатов испытаний дизеля типа Д-245.12С на смесях нефтяного ДТ с РМ и ПМ подтвердил возможность улучшения показателей токсичности ОГ, в первую очередь — снижения дымности ОГ и уменьшения эмиссии оксидов азота при использовании таких смесей. Предложена методика оптимизации состава смесей растительных масел с нефтяным ДТ, основанная на определении обобщенного критерия оптимальности в виде суммы частных критериев оптимальности, характеризующих выбросы нормируемых токсичных компонентов ОГ дизелей. Проведенные исследования подтвердили эффективность использования предложенной методики оптимизации состава смесевых биотоплив, ее информативность при оценке экологических качеств различных топлив и сравнительно небольшой объем расчетных исследований.

Разработана методика оценки экологической безопасности силовых установок с дизелями, учитывающая концентрацию ОГ дизеля полициклических ароматических углеводородов. Расчеты показали эффективность использования предложенной методики для оценки экологической безопасности силовых установок с дизелями, работающими на различных топливах (включая биотоплива), учитывающей выбросы ПАУ с ОГ. Отмечен меньший выброс ПАУ при работе исследуемого дизеля на биотопливах с применением ПМ. Экологическую опасность ОГ дизеля, работающего на том или ином виде топлива, можно оценивать только по выбросу бенз(а)пирена $C_{20}H_{12}$.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Александров А.А., Марков В.А., ред. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания. М., ООО «НИЦ «Инженер», ООО «Онико М», 2012.

- [2] Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск, Изд-во Восточно-украинского университета им. В. Даля, 2009.
- [3] Марков В.А., Девянин С.Н., Наянова М.А. Соевое масло как топливо для дизелей. *Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо*, 2016, № 2, с. 20–38.
- [4] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М., Изд-во МАДИ (ТУ), 2000.
- [5] Knothe G., Van Gerpen J., Krahl J. *Biodiesel handbook*. AOCS Press, 2005.
- [6] Марков В.А., Чайнов Н.Д., Лобода С.С. Физико-химические свойства нефтяных моторных топлив с добавками растительных масел и их влияние на показатели дизеля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 5, с. 108–122. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-108-122
- [7] Аббасов М.Э. Методы оптимизации. СПб., ВВМ, 2014.
- [8] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- [9] Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия. Харьков, Изд-во ХПИ, 2003.
- [10] Марков В.А., Маркова В.В., Сивачев В.М. и др. Оптимизация состава смесового биотоплива для дизельных двигателей. *Безопасность в техносфере*, 2014, № 6, с. 19–30.
- [11] Звонов В.А., Корнилов Г.А., Козлов А.В. и др. Оценка и контроль выбросов дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей. М., Прима-Пресс-М, 2005.
- [12] Александров А.А., Марков В.А., ред. Нефтяные моторные топлива. Экологические аспекты применения. М., ООО «НИЦ «Инженер», 2014.
- [13] Luch A., ed. The carcinogenic effects of polycyclic aromatic hydrocarbons. World Scientific, 2005.
- [14] Morishima A., Narushima T., Moriwaki H., et al. Experimental and numerical studies on particulate matter formed in fuel rich mixture. *SAE Technical Papers*, 2003, no. 2003-01-3175. DOI: 10.4271/2003-01-3175
- [15] Ziejewski M., Goettler H.J., Gook L.W. Polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from plant oil based alternative fuels. *SAE Technical Papers*, 1991, no. 911765. DOI: 10.4271/911765

Марков Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Чайнов Николай Дмитриевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Неверова Вера Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Английский язык для машиностроительных специальностей» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марков В.А., Чайнов Н.Д., Неверова В.В. Оптимизация состава смесевых биотоплив с добавками растительных масел. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 2, с. 114–131. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-2-114-131

OPTIMISING THE COMPOSITION OF BIOFUEL BLENDS WITH VEGETABLE OIL ADDITIVES

V.A. Markov

vladimir.markov58@yandex.ru

N.D. Chaynov

V.V. Neverova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper deals with a topical issue of using biofuels in internal combustion engines. Promising biofuels may be derived from vegetable oils. In agriculture, using blends of petroleum fuel and a moderate amount of vegetable oil is economically feasible. We consider rapeseed oil and sunflower oil as these possible additives. We list physical and chemical properties of vegetable oils and blends of vegetable oils and diesel fuel. We analysed the experimental investigation results concerning the D-245.12S diesel engine running on petroleum fuel and its blends with vegetable oil additives specified above. We demonstrate that it is possible to improve environmental performance of a diesel by using these biofuel blends. We present a method for optimising the composition of petroleum fuel blends with vegetable oil additives that is based on determining a generalised optimality criterion as a sum of partial optimality criteria characterising regulated toxic component content in diesel exhaust gas emissions. We used the method presented to perform optimisation calculations and determine the optimum composition for biofuel blends with vegetable oil additives. We developed a method for estimating environmental safety of diesel power plants that takes into account the concentration of

Keywords

Internal combustion engine, diesel engine, petroleum fuel, vegetable oil, rapeseed oil, sunflower oil, biofuel blend, exhaust gas toxicity, optimization

polycyclic aromatic hydrocarbons in the diesel exhaust gases. We show that knowing benzo[a]pyrene emission levels of a diesel running on a specific type of fuel is enough to estimate the degree of environmental threat of its exhaust gases

Received 09.01.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Markov V.A. eds. Al'ternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Alternative fuels for combustion engines]. Moscow, OOO "NITs "Inzhener" Publ., OOO "Oniko M" Publ., 2012.
- [2] Vasilyev I.P. Vliyanie topliv rastitel'nogo proiskhozhdeniya na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelya [Impact of plant fuels on ecologic and economic parameters of the engine]. Lugansk, VDEUNU Publ., 2009.
- [3] Markov V.A., Devyanin S.N., Nayanova M.A. Soybean oil as a fuel for diesel engines. *Avtogazozapravochnyy kompleks + al'ternativnoe toplivo*, 2016, no. 2, pp. 20–38 (in Russ.).
- [4] L'otko V., Lukanin V.N., Khachiyani A.S. Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [Applying alternative fuels in combustion engines]. Moscow, MADI (TU) Publ., 2000.
- [5] Knothe G., Van Gerpen J., Krahl J. Biodiesel handbook. AOCS Press, 2005.
- [6] Markov V.A., Chaynov N.D., Loboda S.S. Physical and chemical properties of petroleum motor fuels with vegetable oil additives and their effect on diesel performance. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2018, no. 5, pp. 108–122 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-108-122
- [7] Abbasov M.E. Metody optimizatsii [Optimization methods]. St. Petersburg, VVM Publ., 2014.
- [8] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [Toxicity of burnt gas from engines]. Moscow, BMSTU Publ., 2002.
- [9] Parsadanov I.V. Povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti dizeley na osnove kompleksnogo toplivno-ekologicheskogo kriteriya [Quality improvement and competitiveness of diesels based on complex fuel-ecological criteria]. Kharkov, KhPI Publ., 2003.
- [10] Markov V.A., Markova V.V., Sivachev V.M., et al. Optimization of mixed biofuels composition for diesel engines. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2014, no. 6, pp. 19–30 (in Russ.).
- [11] Zvonov V.A., Kornilov G.A., Kozlov A.V., et al. Otsenka i kontrol' vybrosov dispersnykh chastits s otrabotavshimi gazami dizeley [Assessment and control of disperse particles emission from diesel burnt gas]. Moscow, Prima-Press-M Publ., 2005.
- [12] Aleksandrov A.A., Markov V.A., eds. Neftyanye motornye topliva. Ekologicheskie aspekty primeneniya [Oil motor fuels. Ecological usage aspects]. Moscow, OOO "NITs "Inzhener" Publ., 2014.

[13] Luch A., ed. The carcinogenic effects of polycyclic aromatic hydrocarbons. World Scientific, 2005.

[14] Morishima A., Narushima T., Moriwaki H., et al. Experimental and numerical studies on particulate matter formed in fuel rich mixture. *SAE Technical Papers*, 2003, no. 2003-01-3175. DOI: 10.4271/2003-01-3175

[15] Ziejewski M., Goettler H.J., Gook L.W. Polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from plant oil based alternative fuels. *SAE Technical Papers*, 1991, no. 911765. DOI: 10.4271/911765

Markov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Chaynov N.D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Neverova V.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of English Language for Mechanical Engineering Students, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Markov V.A., Chaynov N.D., Neverova V.V. Optimising the composition of biofuel blends with vegetable oil additives. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 2, pp. 114–131 (in Russ.).

DOI: 10.18698/1812-3368-2019-2-114-131