



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu10.2014.4.10>

УДК 621.436,665.11

ББК 31.365

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Марков Владимир Анатольевич**

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика»,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана)  
markov@power.bmstu.ru  
2-я Бауманская ул., 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

**Маркова Вера Владимировна**

Кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры «Английский язык для машиностроительных специальностей»,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана)  
markov@power.bmstu.ru  
2-я Бауманская ул., 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

**Сивачёв Владислав Максимович**

Студент кафедры «Поршневые двигатели»,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана)  
markov@power.bmstu.ru  
2-я Бауманская ул., 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

**Сивачёв Станислав Максимович**

Студент кафедры «Поршневые двигатели»,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана)  
markov@power.bmstu.ru  
2-я Бауманская ул., 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Показаны преимущества использования биотоплив на основе растительных масел в дизельных двигателях. Предложены методики определения оптимального состава смесевых топлив, содержащих нефтяное дизельное топливо и метиловый эфир рапсового масла. С использованием предложенных методик проведены оптимизационные расчеты состава таких смесевых топлив для дизельного двигателя типа Д-245.12С. Показано, что среди исследуемых смесевых биотоплив наилучшими экологическими характеристиками обладает смесь, содержащая 60 % нефтяного дизельного топлива и 40 % метилового эфира рапсового масла. Еще лучшие

экологические характеристики достигаются при регулировании состава такой смеси в соответствии с изменениями частоты вращения вала двигателя и нагрузки на двигатель.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, рапсовое масло, метиловый эфир рапсового масла, смесевое биотопливо, экологические характеристики, токсичность отработавших газов.

В настоящее время основная часть моторных топлив производится из полезных ископаемых, в основном из нефти. Вместе с тем наряду с нефтяными топливами все большее применение находят и другие виды топлива, называемые альтернативными [1; 4]. К 2020 г. в Европе планируется перевести около четверти (23 %) всего автомобильного парка Европы на альтернативные топлива: природный газ – 10 % (23,5 млн автомобилей), биогаз – 8 % (18,8 млн автомобилей), водород (топливные элементы) – 5 % (11,7 млн автомобилей). Повышенный интерес к проблеме использования альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания обусловлен как истощением нефтяных ресурсов и повышением цен на нефть и нефтепродукты, так и назревшей необходимостью решения острых экологических проблем, вызванных быстрым ростом числа транспортных средств.

Необходимо отметить перспективность использования альтернативных топлив, производимых из возобновляемых сырьевых ресурсов. В качестве сырья для производства моторных топлив могут быть использованы отходы лесозаготовки и лесопереработки, древесина, продукты и отходы сельскохозяйственного производства, отходы пищевой промышленности, биогазы, водоросли и другие морские биоресурсы. Использование топлив растительного происхождения обеспечивает кругооборот углекислого газа в атмосфере, поскольку при сжигании биотоплив в двигателях внутреннего сгорания в атмосферу выбрасывается примерно такое же количество углекислого газа, которое поглощается в процессе выращивания сырья для производства биотоплива. Это приводит к уменьшению выброса в атмосферу парниковых газов и предотвращению парникового эффекта, способствующего глобальному потеплению и возникновению различных природных аномалий.

Применительно к наиболее экономичным двигателям внутреннего сгорания – дизельным двигателям (дизелям) наиболее перспек-

тивными считаются топлива, производимые из растительных масел. Цена этих топлив соизмерима с ценой нефтяных топлив, а в ряде случаев – даже ниже. Для условий европейской части России наиболее предпочтительными являются топлива на основе рапсового масла. Использование таких биотоплив позволит не только заместить нефтяные моторные топлива альтернативными, но и улучшить показатели токсичности отработавших газов (ОГ). При работе дизелей на биотопливах, как правило, отмечается заметное уменьшение эмиссии токсичных компонентов ОГ. В первую очередь это относится к дымности ОГ и выбросам других продуктов неполного сгорания топлива, число которых при использовании биотоплив снижается в 1,5–2 раза.

Следует отметить, что по своим физико-химическим свойствам биотоплива ближе к дизельным топливам, чем к бензинам: они имеют сравнительно высокие плотность и вязкость, плохую испаряемость. Поэтому их использование возможно лишь в дизелях, отличающихся меньшей чувствительностью к свойствам применяемого топлива. К тому же дизели, работающие с большой степенью сжатия и повышенными значениями коэффициента избытка воздуха, характеризуются лучшими показателями топливной экономичности и токсичности ОГ. Вместе с тем биотоплива имеют физико-химические свойства, отличающиеся от свойств нефтяного дизельного топлива (ДТ). Поэтому при переводе двигателей, изначально адаптированных к работе на ДТ, на биотоплива, возникает ряд проблем, связанных с организацией рабочих процессов, в первую очередь – топливоподачи, распыливания топлива, смесеобразования и сгорания. При этом возможно нарушение исходных регулировок дизелей, ухудшение ряда эксплуатационных показателей, увеличение износа деталей двигателей и уменьшение ресурса их работы. Одной из проблем, возникающих при адаптации дизелей к работе на смесевых биотопливах, явля-

ется выбор состава этих смесей. Опубликованные в технической литературе данные, в частности в работах [2; 5; 6; 9–11], не позволяют однозначно определить наиболее предпочтительный состав смесевых биотоплив.

На современном этапе развития двигателестроения важнейшим показателем работы дизелей является токсичность их ОГ, то есть выбросы в атмосферу нормируемых токсичных компонентов – оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода  $\text{CO}$ , несгоревших углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_x$  и твердых частиц, основными компонентами которых является сажа (углерод  $\text{C}$ ) [3; 7; 8]. Это обусловлено как ухудшением экологической обстановки, так и ужесточением требований, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания нормативными документами на токсичность ОГ. Недостаточно высокие экологические показатели дизелей, работающих на нефтяных ДТ, также являются побудительной причиной к более широкому использованию биотоплив. Как отмечено выше, наибольшее применение нашло рапсовое масло, но возможно использование и других растительных масел (подсолнечного, соевого и др.) [4].

Для использования в сельской местности (непосредственно на месте производства растительного масла) предпочтительным представляется применение в качестве моторного топлива чистого растительного масла или его смесей с нефтяным дизельным топливом. В этом случае исключаются затраты на транспортировку масла и его переработку. Для централизованного снабжения городского автотранспорта более целесообразно использование метиловых или этиловых эфиров указанных растительных масел. Более дешевыми являются метиловые эфиры растительных масел.

Эфиры растительных масел получают с использованием реакций этерификации и переэтерификации. Реакция переэтерификации рапсового масла метанолом  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  в присутствии катализатора – едкого калия  $\text{KOH}$  протекает при температурах от 80 до 90 °С [там же]. Эта реакция происходит в три стадии – с распадом триацилглицеридов жирных кислот растительных масел с образованием диацилглицеридов, затем моноацилглицеридов и, наконец, с расщеплением последних с образованием метиловых эфиров жирных кис-

лот рапсового масла и глицерина. При переэтерификации из 1 040 килограмм рапсового масла и 144 килограмм метанола получают 1 тонну метилового эфира рапсового масла (МЭРМ) и 200 килограмм глицерина.

Физико-химические свойства МЭРМ приближены к свойствам нефтяных ДТ. В первую очередь это относится к вязкости МЭРМ, вязкость которого на порядок меньше вязкости исходного рапсового масла. Этот эфир целесообразно применять в смесях с нефтяным ДТ. В этом случае МЭРМ можно рассматривать как кислородсодержащую присадку, улучшающую экологические характеристики нефтепродуктов. Однако недостаточно изученной является проблема выбора оптимального состава такого смесевого биотоплива.

При проведении аналитических исследований по определению оптимального состава смесевых биотоплив в качестве наиболее перспективных моторных топлив рассмотрены смеси нефтяного ДТ по ГОСТ 305-82 и МЭРМ. Для получения исходных данных для расчетов оптимального состава этих смесей проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) Минского моторного завода. Исследуемый четырехцилиндровый дизель с турбонаддувом имел рабочий объем  $iV = 4,32$  л, степень сжатия  $\epsilon = 16$ , мощность  $N_e = 80$  кВт при частоте вращения коленчатого вала  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>. В этом дизеле с полуразделенной камерой сгорания (КС) типа ЦНИДИ организовано объемно-плёночное (пристеночное) смесеобразование с частичным попаданием топливного факела на горячие боковые стенки КС, прилегающие к горловине. Дизель оснащен топливной аппаратурой разделенного типа, включающей рядный топливный насос высокого давления (ТНВД) типа *PP4M10U1* фирмы *Motorpal* и форсунки типа *DOP 119S534* фирмы *Motorpal* с пятью сопловыми отверстиями диаметром  $d_p = 0,34$  мм и проходным сечением  $\mu_p f_p = 0,250$  мм<sup>2</sup>. Форсунки были отрегулированы на давление начала впрыскивания  $p_{\text{фо}} = 21,5$  МПа. Более подробное описание конструктивных особенностей исследуемого дизеля приведены в работе [4].

Дизель Д-245.12С исследовался с установочным углом опережения впрыскивания топлива  $\theta = 13^\circ$  поворота коленчатого вала до

верхней мертвой точки и неизменным положением упора дозирующей рейки ТНВД. Исследуемый дизель работал на нефтяном ДТ и смесях нефтяного ДТ и МЭРМ с концентрацией последнего 0 до 60 % (объемное содержание МЭРМ). В таблице 1 представлены некоторые физико-химические свойства указанных топлив.

На каждом из исследуемых топлив испытания проводились на режимах внешней

скоростной характеристики (BCX) и 13-ступенчатого испытательного цикла *ECE R49* для оценки токсичности ОГ дизелей в стендовых условиях (рис. 1). Результаты испытаний дизеля на указанных топливах и режимах представлены в работе [4]. В качестве примера на рисунках 2 и 3 приведены экспериментальные данные, полученные при работе исследуемого дизеля на смеси 80 % ДТ и 20 % МЭРМ.

Таблица 1

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Физико-химические свойства	Топлива						
	ДТ	МЭРМ	95 % ДТ + 5 % МЭРМ	90 % ДТ + 10 % МЭРМ	80 % ДТ + 20 % МЭРМ	60 % ДТ + 40 % МЭРМ	40 % ДТ + 60 % МЭРМ
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	877	832	835	839	848	858
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,80	8,00	3,94	4,09	4,41	5,2	6,0
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	37,8	42,2	41,9	41,5	40,5	39,6
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,6	14,2	14,1	14,0	13,6	13,3
Содержание, % по массе							
С	87,0	77,6	86,5	86,1	85,1	83,2	81,4
Н	12,6	12,2	12,6	12,5	12,5	12,4	12,3
О	0,4	10,2	0,9	1,4	2,4	4,4	6,3
Общее содержание серы, % по массе	0,20	0,002	0,19	0,18	0,16	0,12	0,08

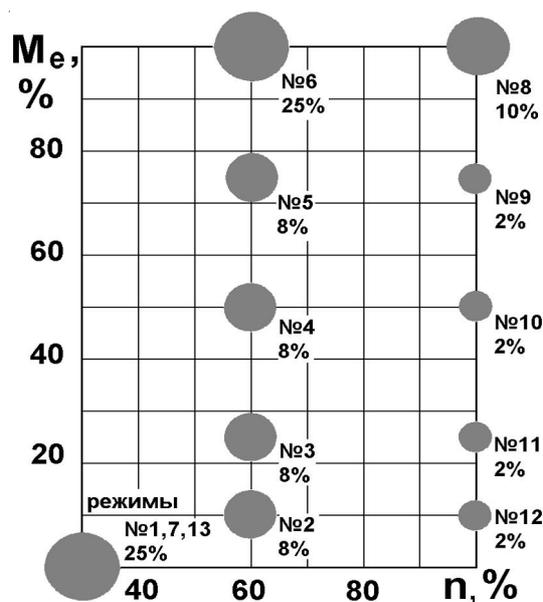


Рис. 1. Испытательный 13-ступенчатый цикл *ECE R49* для оценки токсичности ОГ дизелей в стендовых условиях (около точки каждого режима указаны номер режима и доля этого режима в общем объеме времени работы)

При использовании смесевых биотоплив различного состава удельный эффективный расход топлива  $g_e$  не в полной мере характеризует эффективность процесса сгорания, поскольку эти топлива имеют различную теплотворную способность. Поэтому в процессе оптимизации состава смесевого топлива в качестве частного критерия оптимальности, характеризующего топливную экономичность, выбран эффективный КПД двигателя  $\eta_e$ . В качестве частных критериев оптимальности, отражающих токсичность ОГ, принято содержание в ОГ нормируемых токсичных компонентов – оксидов азота  $NO_x$ , монооксида углерода  $CO$ , несгоревших углеводородов  $CH_x$ .

Кроме того, необходимо учесть выбросы сажи (дымность ОГ) или твердых частиц. Но определение дымности ОГ практически более доступно, чем определение выброса твердых частиц.

Для выбора наиболее целесообразной методики оптимизации состава смесевого топлива предложены следующие три методики. В первой методике обобщенный критерий оптимальности  $J_0$  формируется в виде произведения двух частных критериев. В качестве критерия топливной экономичности  $J_{\eta_e}$  принят эффективный КПД двигателя, а в качестве критерия токсичности ОГ  $J_{NO_x}$  – выброс наиболее значимого токсичного компонента ОГ –

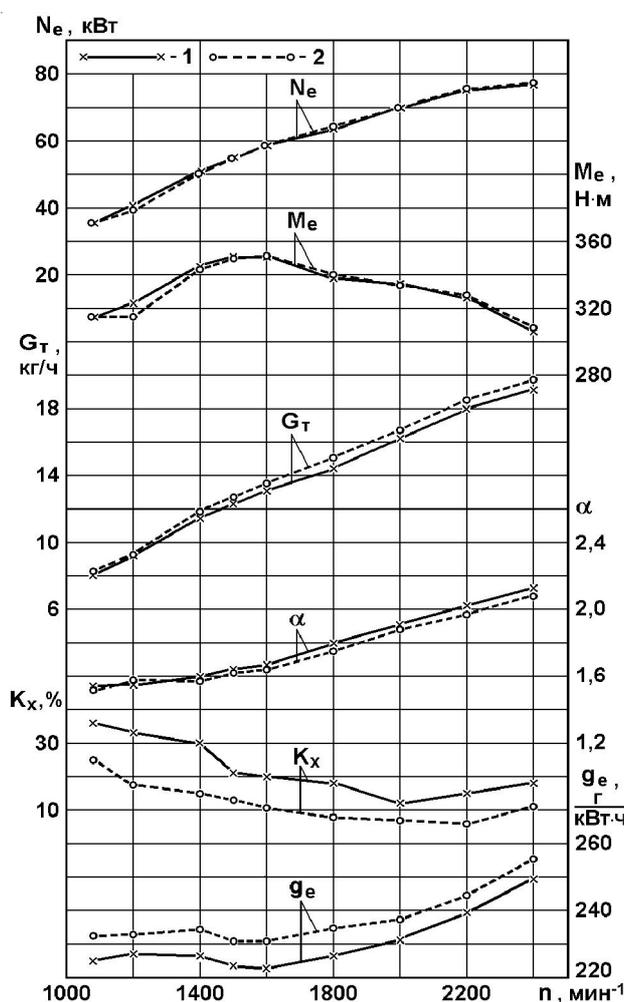


Рис. 2. Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , часового расхода топлива  $G_T$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах ВСХ при использовании различных топлив:

1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ

оксидов азота. Такой обобщенный критерий оптимальности можно записать в виде:

$$J_o = J_{\eta_e} J_{NO_x} = \frac{\eta_{e_{дт}} C_{NO_x i}}{\eta_{e_i} C_{NO_x_{дт}}}, \quad (1)$$

где  $\eta_{e_{дт}}$  и  $C_{NO_x_{дт}}$  – эффективный КПД и концентрация оксидов азота в ОГ дизеля, работающего на нефтяном ДТ;  $\eta_{e_i}$  и  $C_{NO_x i}$  – эффективный КПД и концентрация оксидов азота в ОГ дизеля, работающего на смешевом топливе  $i$ -того состава.

Этот обобщенный критерий оптимальности отличается простотой и сравнительно небольшим объемом необходимых расчетов, но не учитывает выброс ряда нормируемых токсичных компонентов – монооксида углерода CO, несгоревших углеводородов  $CH_x$  и сажи С.

Во второй методике обобщенный критерий оптимальности  $J_o$  формируется в виде суммы частных критериев, характеризующих топливную экономичность  $J_{\eta_e}$ , выброс с ОГ оксидов азота  $J_{NO_x}$ , монооксида углерода  $J_{CO}$ , несгоревших углеводородов  $J_{CH_x}$ , а также дымность ОГ  $J_{K_x}$ :

$$J_o = J_{\eta_e} + J_{NO_x} + J_{CO} + J_{CH_x} + J_{K_x} = \frac{\eta_{e_{дт}}}{\eta_{e_i}} + \frac{C_{NO_x i}}{C_{NO_x_{дт}}} + \frac{C_{CO i}}{C_{CO_{дт}}} + \frac{C_{CH_x i}}{C_{CH_x_{дт}}} + \frac{K_{x i}}{K_{x_{дт}}}, \quad (2)$$

где  $C_{CO_{дт}}$ ,  $C_{CH_x_{дт}}$ ,  $K_{x_{дт}}$  – концентрации монооксида углерода и углеводородов в ОГ дизеля, работающего на ДТ, а также дымность его ОГ;  $C_{CO i}$ ,  $C_{CH_x i}$ ,  $K_{x i}$  – концентрации монооксида углерода и углеводородов в ОГ дизеля, работающего на смешевом топливе  $i$ -того состава, а также дымность его ОГ.

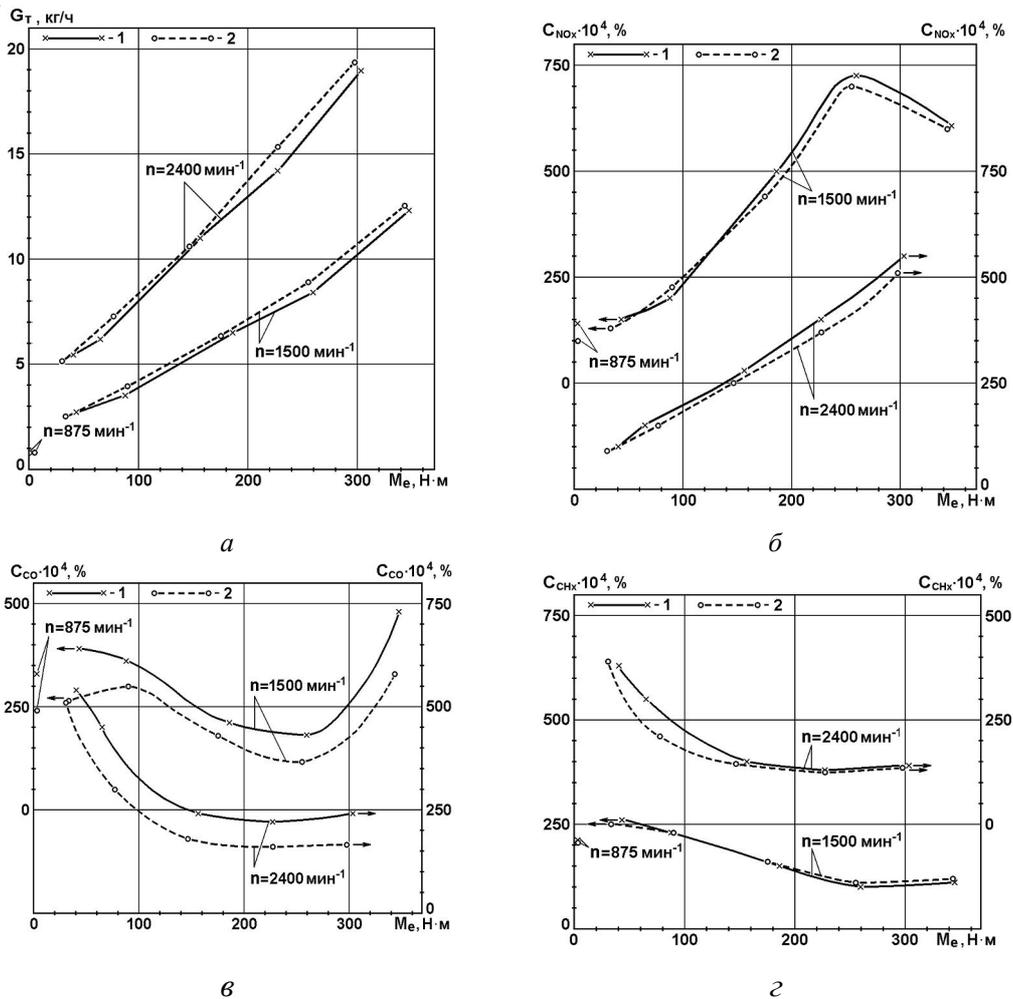


Рис. 3. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  (а) и концентраций в ОГ дизеля Д-245.12С оксидов азота  $C_{NO_x}$  (б), монооксида углерода  $C_{CO}$  (в) и углеводородов  $C_{CH_x}$  (г) от частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$  на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла ECE R49 при использовании различных топлив:

1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ

При формировании этого критерия оптимальности последнее слагаемое учитывалось лишь на режимах ВСХ, на которых измерялась дымность ОГ. На режимах с неполной нагрузкой дымность ОГ не нормируется, и обобщенный критерий оптимальности  $J_0$  выражения (2) включает лишь первые четыре слагаемые.

Третья методика предусматривает формирование обобщенного критерия оптимальности  $J_0$  в виде суммы частных критериев, аналогичной выражению (2), но вводятся весовые коэффициенты, характеризующие значимость каждого из слагаемых:

$$\begin{aligned}
 J_0 &= a_{\eta_e} J_{\eta_e} + a_{NO_x} J_{NO_x} + a_{CO} J_{CO} + \\
 &+ a_{CH_x} J_{CH_x} + a_{K_x} J_{K_x} = \\
 &= a_{\eta_e} \frac{\eta_{e\text{ дт}}}{\eta_{ei}} + a_{NO_x} \frac{C_{NO_x i}}{C_{NO_x \text{ дт}}} + a_{CO} \frac{C_{CO i}}{C_{CO \text{ дт}}} + \\
 &+ a_{CH_x} \frac{C_{CH_x i}}{C_{CH_x \text{ дт}}} + a_{K_x} \frac{K_{xi}}{K_{x \text{ дт}}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

При этом весовой коэффициент  $a_{\eta_e}$ , характеризующий эффективный КПД, принят равным единице, а весовые коэффициенты  $a_{NO_x}$ ,  $a_{CO}$ ,  $a_{CH_x}$ , характеризующие выброс нормируемых токсичных компонентов, определялись в виде отношений действительной эмиссии токсичных компонентов ОГ дизеля, работающего на ДТ ( $e_{NO_x}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CH_x}$ ), к предельным величинам эмиссии, определяемым нормами на токсичность ОГ ( $e_{NO_x \text{ пр}}$ ,  $e_{CO \text{ пр}}$ ,  $e_{CH_x \text{ пр}}$ ):

$$\begin{aligned}
 a_{NO_x} &= e_{NO_x} / e_{NO_x \text{ пр}}; \\
 a_{CO} &= e_{CO} / e_{CO \text{ пр}}; \\
 a_{CH_x} &= e_{CH_x} / e_{CH_x \text{ пр}}.
 \end{aligned}$$

Весовой коэффициент частного критерия дымности ОГ  $a_{K_x}$  определялся в виде отношения дымности ОГ  $K_x$  дизеля, работающего на ДТ на режиме максимального крутящего момента, к предельному значению дымности ОГ  $K_{x \text{ пр}}$  дизеля на этом режиме, определяемому нормами на дымность ОГ:

$$a_{K_x} = K_x / K_{x \text{ пр}}.$$

Как и в выражении (2), в третьей методике последнее слагаемое в выражении для  $J_0$  учитывалось лишь на режимах ВСХ, а на режимах с неполной нагрузкой обобщенный критерий оп-

тимальности  $J_0$  выражения (3) включает лишь первые четыре слагаемые. При расчетных исследованиях с использованием третьей методики весовые коэффициенты  $a_{NO_x}$ ,  $a_{CO}$ ,  $a_{CH_x}$  частных критериев оптимальности, характеризующих выбросы газообразных токсичных компонентов ОГ, определялись при ограничениях на эти выбросы, накладываемых нормами EURO-4. Весовой коэффициент, характеризующий дымность ОГ, определялся по выражению  $a_{K_x} = K_x / K_{x \text{ пр}}$ , где ограничение на предельную дымность ОГ регламентируется Правилами 24-03 ЕЭК ООН. С использованием принятых допущений получены следующие значения весовых коэффициентов частных критериев оптимальности:

$$\begin{aligned}
 a_{\eta_e} &= 1,0; \quad a_{NO_x} = e_{NO_x} / e_{NO_x \text{ пр}} = 7,286/3,5 = 2,08; \\
 a_{CO} &= e_{CO} / e_{CO \text{ пр}} = 2,834/1,5 = 1,89; \\
 a_{CH_x} &= e_{CH_x} / e_{CH_x \text{ пр}} = 0,713/0,5 = 1,426; \\
 a_{K_x} &= K_x / K_{x \text{ пр}} = 21,0/56,2 = 0,37.
 \end{aligned}$$

Эти значения весовых коэффициентов приняты постоянными для всех исследуемых видов топлива и режимов работы.

Для проведения оптимизационных расчетов экспериментальные данные по дизелю типа Д-245.12С, обработаны с использованием методов линейной интерполяции и экстраполяции. В результате получены данные по расходу топлива и концентрациям в ОГ нормируемых токсичных компонентов ОГ в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов дизеля типа Д-245.12С, работающего на различных топливах. С использованием данных по удельному эффективному расходу топлива  $g_e$  получены соответствующие значения эффективного КПД  $\eta_e$  по зависимости:

$$\eta_e = 3600 / (H_U \cdot g_e),$$

где  $H_U$  – низшая теплота сгорания топлива (для ДТ она равна 42,5 МДж/кг).

Затем рассчитаны оптимальные составы смешанного топлива во всем диапазоне эксплуатационных режимов – при частотах вращения  $n = 800, 1200, 1600, 2000, 2400 \text{ мин}^{-1}$  и нагрузках, соответствующих относительным значениям крутящего момента двигателя  $M_e - 10, 25, 50, 75$  и  $100 \%$  от максимального  $M_{e\text{ макс}}$ .

В соответствии с тремя предложенными методиками в каждой узловой точке определялись значения обобщенных критериев оптимальности с использованием выражений (1), (2) и (3) при работе на каждом из исследуемых топлив. Затем в каждой узловой точке определялся состав топлива, при котором обобщенный критерий принимал свое минимальное значение. Этот состав топлива и принимался за оптимальный.

С использованием разработанных методик оптимизации состава смесового биотоплива и указанных результатов экспериментальных исследований дизеля, работающего на смесевых биотопливах, проведены оптимизационные расчеты состава смесевых биотоплив – смесей ДТ и МЭРМ. В результате расчетных исследований получены три базовые характеристики оптимального состава биотоплива, представленные на рисунке 4.

Для определения показателей дизеля, в котором реализуются полученные базовые характеристики состава смесового биотоплива (рис. 4), в соответствии с указанными экспериментальными данными рассчитаны значения удельных выбросов основных нормируемых токсичных компонентов  $e_{NO_x}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CH_x}$  на режимах 13-ступенчатого цикла *ECE R49* (см. рис. 1) по выражениям:

$$e_{NO_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{NO_x i} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}; \quad e_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{CO i} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i};$$

$$e_{CH_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{CH_x i} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i},$$

где  $E_{NO_x i}$ ,  $E_{CO i}$ ,  $E_{CH_x i}$  – массовые выбросы токсичных компонентов ОГ на  $i$ -том режиме, г/ч;  $N_{ei}$  – мощность двигателя на этом режиме, кВт;  $K_i$  – ко-

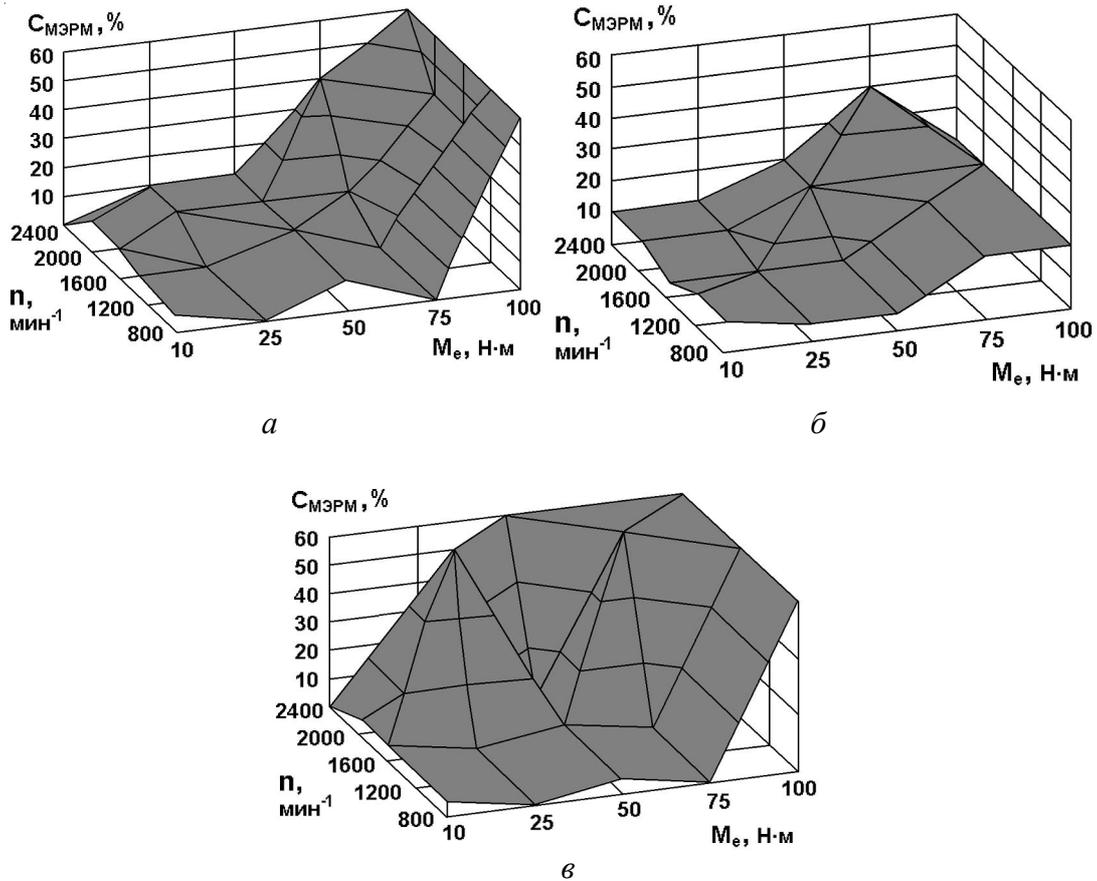


Рис. 4. Базовые характеристики оптимального состава биотоплива:

*a* – характеристика, полученная по выражению (1); *б* – по выражению (2); *в* – по выражению (3)

эффицент, отражающий долю времени  $i$ -того режима в 13-ступенчатом цикле *ECE R49*.

Оценка эксплуатационного расхода топлива проведена по среднему на режимах 13-ступенчатого цикла (условному) удельному эффективному расходу топлива, который определен с использованием зависимости [4]:

$$g_{e\text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{Ti} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i},$$

где  $G_{Ti}$  – часовой расход топлива на  $i$ -том режиме.

Топливная экономичность дизеля при его работе на этих топливах оценивалась эффективным КПД  $\eta_e$ . Причем для интегральной оценки работы дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла использован условный эффективный КПД, определяемый из соотношения

$$\eta_{e\text{ усл}} = \frac{3600}{H_U \cdot g_{e\text{ усл}}}.$$

Результаты этих расчетов приведены в таблице 2.

Для оценки суммарной токсикологической агрессивности ОГ дизеля, работающего на различных топливах, предлагается использовать суммарный условный коэффициент агрессивности ОГ  $A_{\text{ОГ}}$ , определяемый в виде

суммы относительных удельных выбросов нормируемых токсичных компонентов ОГ  $e_{\text{NO}_x}$ ,  $e_{\text{CO}}$ ,  $e_{\text{CH}_x}$ , а также дымности ОГ  $K_x$  на режиме максимального крутящего момента с учетом относительных условных коэффициентов агрессивности  $A_i$  этих компонентов:

$$A_{\text{ОГ}} = A_{\text{NO}_x} \frac{e_{\text{NO}_x i}}{e_{\text{NO}_x \text{ ДТ}}} + A_{\text{CO}} \frac{e_{\text{CO} i}}{e_{\text{CO} \text{ ДТ}}} + A_{\text{CH}_x} \frac{e_{\text{CH}_x i}}{e_{\text{CH}_x \text{ ДТ}}} + A_{K_x} \frac{K_{xi}}{K_{x \text{ ДТ}}}$$

где  $e_{\text{NO}_x \text{ ДТ}}$ ,  $e_{\text{CO} \text{ ДТ}}$ ,  $e_{\text{CH}_x \text{ ДТ}}$ ,  $K_{x \text{ ДТ}}$  – выбросы с ОГ токсичных компонентов и дымность ОГ по Хартриджу при использовании ДТ;  $e_{\text{NO}_x i}$ ,  $e_{\text{CO} i}$ ,  $e_{\text{CH}_x i}$ ,  $K_{xi}$  – аналогичные параметры при работе на смеси топлива  $i$ -того состава;  $A_{\text{NO}_x} = 41,1$ ,  $A_{\text{CO}} = 1,0$ ,  $A_{\text{CH}_x} = 3,16$ ,  $A_{K_x} = 200$  – коэффициенты агрессивности нормируемых токсичных компонентов ОГ, предложенные Центральным научно-исследовательским автомобильным и автомоторным институтом (НАМИ) [12].

Они учитывают не только значения предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ, но и вероятность накопления их в атмосфере, их вторичных химических превращений, оседание твердых частиц на поверхность земли, воздействие токсичных компонентов ОГ на сельскохозяйственные растения и животных. При определении суммарного условного коэффициента агрессивности ОГ  $A_{\text{ОГ}}$  использованы значения дымности ди-

Таблица 2

**Показатели дизеля при различных составах смеси биотоплива и формировании различных оптимизированных характеристик составов смеси биотоплива**

Состав смеси	$e_{\text{NO}_x}$ г/(кВт·ч)	$e_{\text{CO}}$ г/(кВт·ч)	$e_{\text{CH}_x}$ г/(кВт·ч)	Дымность ОГ, % по шкале Хартриджа на режимах с полной нагрузкой		$g_{e\text{ усл}}$ г/(кВт·ч)	Условный эффективный КПД двигателя $\eta_{e\text{ усл}}$	Суммарный условный коэффициент агрессивности ОГ $A_{\text{ОГ}}$
				$n = 2400$ мин <sup>-1</sup>	$n = 1500$ мин <sup>-1</sup>			
100 % ДТ	7,286	2,834	0,713	18,0	21,0	245,8	0,345	245,3
95 % ДТ + 5% МЭРМ	6,894	2,234	0,626	18,0	17,0	249,2	0,342	204,4
90 % ДТ + 10% МЭРМ	6,718	2,199	0,658	13,5	16,0	253,6	0,338	194,0
80 % ДТ + 20% МЭРМ	6,542	2,096	0,727	11,0	13,0	256,5	0,338	164,7
60 % ДТ + 40% МЭРМ	7,441	2,021	0,692	10,0	7,5	261,3	0,339	116,9
40 % ДТ + 60% МЭРМ	7,759	1,932	0,681	7,0	8,5	265,0	0,342	128,4
Характеристика № 1	7,216	2,075	0,745	7,0	7,5	257,7	0,339	116,2
Характеристика № 2	6,555	2,155	0,685	11,0	13,0	255,1	0,338	164,6
Характеристика № 3	6,796	2,081	0,671	7,0	7,5	256,7	0,342	113,5

зеля на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ , поскольку из двух нормируемых режимов (режимы максимальной мощности и максимального крутящего момента) на этом режиме отмечается большая дымность ОГ. Результаты расчетов суммарного условного коэффициента агрессивности ОГ  $A_{\text{ОГ}}$  для рассматриваемых смесевых биотоплив и для полученных базовых характеристик состава топлива приведены в таблице 2.

Полученные значения этих коэффициентов свидетельствуют о том, что среди рассматриваемых смесевых биотоплив наилучшими экологическими характеристиками обладает смесь 60 % ДТ и 40 % МЭРМ. При работе на этой смеси коэффициент агрессивности ОГ оказался минимальным:  $A_{\text{ОГ}} = 116,9$ . Это значение в два раза ниже по сравнению с работой на ДТ ( $A_{\text{ОГ}} = 245,3$ ). Среди полученных базовых характеристик состава смесевых биотоплив наилучшими экологическими свойствами отличается характеристика № 3 (см. рис. 4, в). При ее реализации достигается минимальное значение суммарного условного коэффициента агрессивности ОГ:  $A_{\text{ОГ}} = 113,5$  (см. табл. 2). Следует также отметить, что при формировании базовой характеристики № 3 достигается улучшение показателей топливной экономичности по сравнению с работой на смеси 60 % ДТ и 40 % МЭРМ. В первом случае эффективный КПД  $\eta_{\text{е усл}}$  был равен 0,342, а во втором – 0,339.

### Выводы

Представленные результаты расчетно-экспериментальных исследований подтверждают эффективность использования смесевых биотоплив в отечественных дизельных двигателях и необходимость оптимизации состава смесевых биотоплив. При этом целесообразно проводить сравнительную оценку экологических характеристик различных смесевых биотоплив с использованием разработанных методик. Проведенные расчеты подтвердили эффективность предложенных методик.

Для оценки суммарной токсикологической агрессивности ОГ дизеля, работающего на различных топливах, рекомендовано использовать суммарный условный коэффициент агрессивности ОГ  $A_{\text{ОГ}}$ .

Его предложено определять как сумму относительных удельных выбросов нормируемых токсичных компонентов – оксидов азота, монооксида углерода, несгоревших углеводородов, а также дымности ОГ на режиме максимального крутящего момента с учетом относительных условных коэффициентов агрессивности этих компонентов.

Расчеты показали, что наилучшими экологическими характеристиками обладает смесь 60 % ДТ и 40 % МЭРМ. При работе дизеля типа Д-245.12С на этой смеси коэффициент агрессивности ОГ оказался минимальным:  $A_{\text{ОГ}} = 116,9$ . Это значение в два раза ниже по сравнению с работой на нефтяном ДТ ( $A_{\text{ОГ}} = 245,3$ ).

Показана целесообразность регулирования состава рассматриваемых смесей в соответствии с изменениями частоты вращения и нагрузки на двигатель. Наилучшие результаты получены для базовой характеристики на рисунке 4, в, построенной по методике с использованием выражения (3). При ее реализации достигается минимальное значение суммарного условного коэффициента агрессивности ОГ:  $A_{\text{ОГ}} = 113,5$ . Кроме того, при формировании базовой характеристики на рисунке 4, в, отмечено улучшение показателей топливной экономичности по сравнению с работой на смеси 60 % ДТ и 40 % МЭРМ. В первом случае эффективный КПД  $\eta_{\text{е усл}}$  был равен 0,342, а во втором – 0,339.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А. А. Александров, И. А. Архаров, В. А. Марков [и др.] ; под ред. А. А. Александрова, В. А. Маркова. – М. : НИЦ «Инженер» : Оникс-М, 2012. – 791 с.
2. Горбунов, В. В. Экспериментальные исследования дизеля ЯМЗ-238 при его работе на смесевых топливах / В. В. Горбунов, Н. Н. Патрахальцев, А. М. Абелян // Вестник Российского университета дружбы народов. Инженерные исследования. – 2003. – № 1. – С. 5–10.
3. Ерохов, В. И. Токсичность современных автомобилей (методы и средства снижения вредных выбросов в атмосферу) / В. И. Ерохов. – М. : Форум, 2013. – 448 с.
4. Использование растительных масел и топ-лив на их основе в дизельных двигателях / В. А. Мар-

ков, С. Н. Девянин, В. Г. Семенов [и др.]. – М. : НИЦ «Инженер» : О니ко-М, 2011. – 536 с.

5. Кулманаков, С. П. Особенности рабочего процесса дизельного двигателя при использовании смесей рапсового масла и дизельного топлива / С. П. Кулманаков, Р. С. Семенов // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 55–58.

6. Кухарёнок, Г. М. Влияние смесового биотоплива на рабочий процесс дизеля / Г. М. Кухарёнок, В. А. Бармин // Вісник НАУ : (Вестник Национального авиационного университета, г. Киев). – 2009. – № 1. – С. 122–125.

7. Кульчицкий, А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие / А. Р. Кульчицкий. – Владимир : Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2000. – 256 с.

8. Марков, В. А. Токсичность отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габитов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.

9. Применение растительного масла в дизелях в качестве добавки к топливу / А. И. Крайнюк, И. П. Васильев, А. Е. Петренко [и др.] // Экологические и ресурсосбережение. – 2001. – № 6. – С. 16–20.

10. Семенов, В. Г. Оптимизация состава бинарного альтернативного дизельного топлива / В. Г. Семенов // Химия и технология топлив и масел. – 2003. – № 4. – С. 29–32.

11. Фомин, В. Н. Показатели работы дизеля на биотопливе / В. Н. Фомин, Х. Х. Губейдуллин // Сельский механизатор. – 2009. – № 11. – С. 34–35.

12. Экологические аспекты применения моторных топлив на транспорте / В. Ф. Кутенев, В. А. Звонков, В. И. Черных [и др.] // Автомобильные и тракторные двигатели : межвуз. сб. – М. : Изд-во ТУ «МАМИ», 1998. – Вып. 14. – С. 150–160.

## REFERENCES

1. Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Markov V.A. *Alternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Alternative Fuels for Internal Combustion Engines]. Moscow, NIC “Inzhener” Publ., Oniko-M Publ., 2012. 791 p.

2. Gorbunov V.V., Patrakhaltsev N.N., Abelyan A.M. *Eksperimentalnye issledovaniya dizelya YaMZ-238 pri ego rabote na smesevykh toplivakh* [Experimental Studies on Diesel YaMZ-238 During Its Work on Mixed Fuel]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Inzhenernye issledovaniya*, 2003, no. 1, pp. 5-10.

3. Erokhov V.I. *Toksichnost sovremennykh avtomobiley (metody i sredstva snizheniya vrednykh vybrosov v atmosfere)* [Toxicity of Modern Cars (Methods and Means of Reducing Harmful Emissions into the Atmosphere)]. Moscow, Forum Publ., 2013. 448 p.

4. Markov V.A., Devyanin S.N., Semenov V.G. *Ispolzovanie rastitelnykh masel i topliv na ikh osnove v dizelnykh dvigatelyakh* [The Use of Vegetable Oils and Fuels on Their Basis in Diesel Engines]. Moscow, NIC “Inzhener” Publ., Oniko-M Publ., 2011. 536 p.

5. Kulmanakov S.P., Semenov R.S. *Osobennosti rabocheho protsessa dizelnogo dvigatelya pri ispolzovanii smesey rapsovogo masla i dizelnogo topliva* [Features of Diesel Engine Workflow Using the Mixtures of Rapeseed Oil and Diesel Fuel]. *Polzunovskiy vestnik*, 2007, no. 4, pp. 55-58.

6. Kukharenok G.M., Barmin V.A. *Vliyanie smesevogo biotopliva na rabochiy protsess dizelya* [The Influence of Mixed Biofuels on Diesel Workflow]. *Vestnik Natsionalnogo aviatsionnogo universiteta*, 2009, no. 1, pp. 122-125.

7. Kulchitskiy A.R. *Toksichnost avtomobilnykh i traktornykh dvigateley* [The Toxicity of Auto- and Tractor Engines]. Vladimir, Izd-vo Vladimirskego gos. un-ta, 2000. 256 p.

8. Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost otrabotavshikh gazov dizeley* [The Toxicity of Engines Waste Gases]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2002. 376 p.

9. Kraynyuk A.I., Vasilyev I.P., Petrenko A.E., et al. *Primenenie rastitelnoho masla v dizelyakh v kachestve dobavki k toplivu* [The Use of Vegetable Oil as a Diesel Fuel Additive]. *Ekotekhnologii i resursosberezhnie*, 2001, no. 6, pp. 16-20.

10. Semenov V.G. *Optimizatsiya sostava binarnogo alternativnogo dizelnogo topliva* [Optimization of Composition of Binary Alternative Diesel Fuel]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 2003, no. 4, pp. 29-32.

11. Fomin V.N., Gubeydullin Kh.Kh. *Pokazateli raboty dizelya na biotoplive* [The Indicators of Diesel Engine Work on Biofuel]. *Selskiy mekhanizator*, 2009, no. 11, pp. 34-35.

12. Kutenev V.F., Zvonov V.A., Chernykh V.I., et al. *Ekologicheskie aspekty primeneniya motornykh topliv na transporte* [Environmental Aspects of Motor Fuels Use in Transport]. *Avtomobilnye i traktornye dvigateli* [Auto- and Tractor Engines]. Moscow, Izd-vo TU “МАМИ”, 1998, iss. 14, pp. 150-160.

**OPTIMIZATION OF COMPOSITION OF MIXED BIOFUELS MADE  
FROM VEGETABLE OILS FOR DIESEL ENGINES**

**Markov Vladimir Anatolyevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Thermophysics,  
Bauman Moscow State Technical University  
markov@power.bmstu.ru  
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

**Markova Vera Vladimirovna**

Candidate of Technical Sciences, Teacher,  
Department of English for Engineering Professions,  
Bauman Moscow State Technical University  
markov@power.bmstu.ru  
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

**Sivachev Vladislav Maksimovich**

Student, Department of Piston Engines,  
Bauman Moscow State Technical University  
markov@power.bmstu.ru  
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

**Sivachev Stanislav Maksimovich**

Student, Department of Piston Engines,  
Bauman Moscow State Technical University  
markov@power.bmstu.ru  
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Currently the most part of motor fuels are produced from mineral resources, mainly, from oil. However, along with oil fuels the increasing application of alternative fuels takes place.

You must acknowledge the advantages of using alternative fuels produced from the renewable natural resources. As raw material for the production of motor fuels, the following resources can be used: logging and wood processing wastes, wood products and agricultural waste, food industry wastes, biogas, algae and other marine bioresources. The use of fuels of vegetable origin provides circulation of carbon dioxide in the atmosphere, because the combustion of biofuels in internal combustion engines emits about the same amount of carbon dioxide, which is absorbed in the process of preparing raw materials for biofuel production. This leads to the reduction of greenhouse gases emissions and the prevention of the greenhouse effect, global warming and the emergence of various natural anomalies.

The authors show the advantages of using biofuels made from vegetable oils in diesel engines and propose the methods of determining the optimal composition of mixed fuels which contain oil diesel fuel and methyl ether of rapeseed oil. Using the proposed methods the authors carry out the optimizational calculations of the composition of such mixed fuels for the

diesel engine of Д-245.12С. type. It is shown that the mixture which contains 60 % of the oil diesel fuel and 40 % of the rapeseed oil methyl ester has the best ecological characteristics among the studied mixed biofuels. Even better ecological characteristics are reached when the ingredients of such a mixture are selected according to the changes of engine shaft rotation speed and engine load.

**Key words:** diesel engine, oil diesel fuel, rapeseed oil, rapeseed oil methyl ester, mixed biofuel, ecological characteristics, exhaust gases toxicity.