

**УДК 620.22, 621.436, 665.334**

**Оптимизация состава смесового биотоплива**

**Марков В.А., Лобода С.С., Бирюков В.В., Блинов А.С.**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

**Девянин С.Н.**

*РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия*

**Optimization of Composition of Mixed Biofuels**

**Markov V.A., Loboda S.S., Biryukov V.V., Blinov A.S.**

*Moscow State Technical University named after N.E. Bauman*

**Devyanin S.N.**

*RGAU-MSKhA named after K.A. Timiryazev, Russia*

*Рассмотрена возможность использования смесей нефтяного дизельного топлива с метиловыми эфирами рапсового и подсолнечного масел в качестве топлива для дизелей. Проведен анализ физико-химических свойств исследуемых смесевых биотоплив. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С, работающего на дизельном топливе и смесевых биотопливах. Предложена методика оптимизации состава смесевых биотоплив.*

*An opportunity of using petroleum diesel fuel and methyl esters of rapeseed and sunflower oils mixtures as a fuel for diesel engines is considered. An analysis of physico-chemical properties of the studied biofuel mixtures is conducted. The results of experimental studies of the diesel engine D-245.12 S, operating on diesel fuel and biofuel mixtures are shown. Method of optimization of mixed biofuels composition is suggested.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, альтернативное топливо, метиловый эфир рапсового масла, метиловый эфир подсолнечного масла, смесовое биотопливо, оптимизация

**Key words:** diesel engine, petroleum diesel fuel, alternative fuel, methyl ester of rapeseed oil, methyl ester of sunflower oil, mixed biofuel, optimization

## ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития энергетики характеризуется истощением мировых запасов полезных ископаемых при одновременном увеличении энергопотребления, поэтому в недалекой перспективе сырьевая база для производства энергоносителей для мобильных и стационарных энергетических установок существенно расширится. Их будут производить не только из полезных ископаемых, но и из возобновляемых источников энергии (биомасса, растительные масла, спирты и др.). Еще одним фактором, способствующим более широкому внедрению этих энергоносителей, является необходимость удовлетворения все более жестких требований к показателям токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей. В ряде стран для автомобильной техники уже достаточно широко применяются биотоплива – растительные масла, их производные (биодизельное топливо или «биодизель» – сложные эфиры растительных масел), биогаз, биоэтанол, животные жиры [1, 2, 3].

Среди топлив растительного происхождения наибольшее практическое применение для автомобильных дизелей нашло биодизельное топливо [2, 3, 4]. При этом основой сырьевой базы для его производства остаются следующие виды масел – рапсовое, подсолнечное, соевое и пальмовое. Выход биодизельного топлива из исходного сырья в значительной степени определяется выбранной технологией его получения. Разработаны различные технологии производства биодизельного топлива [3]. Одной из наиболее перспективных является переработка рапсового масла (РМ) – получение сложного метилового эфира путем переэтерификации РМ с добавкой метанола при температуре 80...90 °С в присутствии катализатора – едкого калия КОН. Из семян рапса с 1 га посевов (в среднем 3 т) извлекают около 1 т масла. Затем масло подвергается переэтерификации, в результате чего получается около 1000 кг метилового эфира рапсового масла (МЭРМ). Аналогично получают и метиловый эфир подсолнечного масла (МЭПМ).

Необходимо отметить, что эфиры растительных масел отличаются от самих масел меньшими плотностью и вязкостью, более высоким цетановым числом (ЦЧ), меньшей температурой воспламенения. В связи с этим при использовании чистых эфиров растительных масел возможно заметное изменение характера рабочих процессов дизелей. Поэтому более целесообразным представляется использование смесей нефтяного дизельного топлива (ДТ) и метиловых эфиров растительных масел.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЗЕЛЯ НА СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВА

Для оценки показателей дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) при его работе на смесях нефтяного ДТ с МЭРМ проведены его испытания [3]. На указанном дизеле исследовались смесевые биотоплива с содержанием МЭРМ в ДТ марки «Л» по ГОСТ 305-82 от 0 до 60 % (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические свойства смесей нефтяного ДТ и МЭРМ

| Свойства                                                            | Топлива |      |                        |                         |                         |                         |                         |
|---------------------------------------------------------------------|---------|------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                                                     | ДТ      | МЭРМ | 95% ДТ<br>+ 5%<br>МЭРМ | 90% ДТ +<br>10%<br>МЭРМ | 80% ДТ<br>+ 20%<br>МЭРМ | 60% ДТ<br>+ 40%<br>МЭРМ | 40% ДТ<br>+ 60%<br>МЭРМ |
| Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>                              | 830     | 877  | 832                    | 835                     | 839                     | 848                     | 858                     |
| Вязкость кинематическая<br>при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с            | 3,8     | 8,0  | 3,94                   | 4,09                    | 4,41                    | 5,2                     | 6,0                     |
| Коэффициент<br>поверхностного натяжения<br>при 20 °С, мН/м          | 27,1    | 30,7 | –                      | –                       | –                       | –                       | –                       |
| Теплота сгорания низшая,<br>МДж/кг                                  | 42,5    | 37,8 | 42,2                   | 41,9                    | 41,5                    | 40,5                    | 39,6                    |
| Цетановое число                                                     | 45      | 48   | –                      | –                       | –                       | –                       | –                       |
| Температура<br>самовоспламенения, °С                                | 250     | 230  | –                      | –                       | –                       | –                       | –                       |
| Температура помутнения, °С                                          | –25     | –13  | –                      | –                       | –                       | –                       | –                       |
| Температура застывания, °С                                          | –35     | –21  | –                      | –                       | –                       | –                       | –                       |
| Количество воздуха,<br>необходимое для сгорания 1<br>кг топлива, 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                     |

Примечание: для смесевых топлив указано объемное процентное содержание в них ДТ и МЭРМ

На первом этапе дизель Д-245.12С испытывался на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) при его работе на ДТ и смеси 80 % ДТ и 20 % МЭРМ (рис. 1 и в табл. 2). На втором этапе испытаний дизель Д-245.12С исследован на режимах 13-режимного испытательного цикла *ECE R49*. Режимы этого цикла показаны на рис. 2, а результаты исследований дизеля на этих режимах представлены на рис. 3 и в табл. 2.

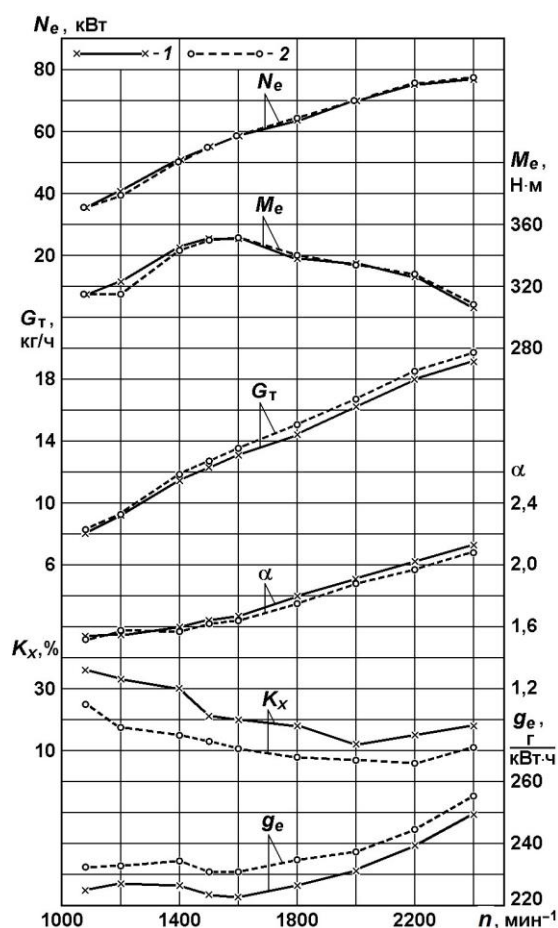


Рис. 1. Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , часового расхода топлива  $G_T$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах ВСХ: 1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ

Таблица 3. Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на смесях нефтяного ДТ и МЭРМ

| Показатели дизеля                           | Объемная концентрация МЭРМ<br>в смесевом биотопливе, % |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                             | 0                                                      | 5     | 10    | 20    | 40    | 60    |
| Часовой расход топлива $G_T$ , кг/ч:        |                                                        |       |       |       |       |       |
| - на режиме максимальной мощности           | 19,13                                                  | 19,45 | 19,76 | 19,76 | 20,02 | 20,43 |
| - на режиме максимального крутящего момента | 12,30                                                  | 12,50 | 12,54 | 12,68 | 12,98 | 13,16 |
| Крутящий момент $M_e$ , Н·м:                |                                                        |       |       |       |       |       |
| - на режиме максимальной мощности           | 306                                                    | 306   | 310   | 308   | 308   | 309   |
| - на режиме максимального крутящего момента | 351                                                    | 356   | 350   | 349   | 351   | 355   |

|                                                                                                                                                                                                                                 |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Дымность ОГ $K_x$ , % по шкале Хартриджа:<br>- на режиме максимальной мощности<br>- на режиме максимального крутящего момента                                                                                                   | 18,0<br>21,0            | 18,0<br>17,0            | 13,5<br>16,0            | 11,0<br>13,0            | 10,0<br>7,5             | 7,0<br>8,5              |
| Удельный эффективный расход топлива $g_e$ ,<br>г/(кВт·ч):<br>- на режиме максимальной мощности<br>- на режиме максимального крутящего момента                                                                                   | 249,2<br>223,2          | 252,9<br>223,7          | 253,8<br>228,0          | 255,3<br>230,6          | 258,5<br>234,7          | 262,2<br>236,0          |
| Эффективный КПД дизеля $\eta_e$ :<br>- на режиме максимальной мощности<br>- на режиме максимального крутящего момента                                                                                                           | 0,340<br>0,379          | 0,337<br>0,381          | 0,337<br>0,376          | 0,339<br>0,376          | 0,343<br>0,378          | 0,346<br>0,384          |
| Условные (средние) показатели топливной<br>экономичности дизеля на режимах 13-<br>режимного цикла:<br>- эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)<br>- эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$                    | 245,76<br>0,345         | 249,20<br>0,342         | 253,62<br>0,338         | 256,54<br>0,338         | 261,28<br>0,339         | 265,00<br>0,342         |
| Интегральные удельные выбросы токсичных<br>компонентов на режимах 13-режимного цикла,<br>г/(кВт·ч):<br>- оксиды азота $e_{\text{NO}_x}$<br>- монооксид углерода $e_{\text{CO}}$<br>- несгоревшие углеводороды $e_{\text{CH}_x}$ | 7,286<br>2,834<br>0,713 | 6,894<br>2,234<br>0,626 | 6,718<br>2,199<br>0,658 | 6,542<br>2,096<br>0,727 | 7,441<br>2,021<br>0,692 | 7,759<br>1,932<br>0,681 |

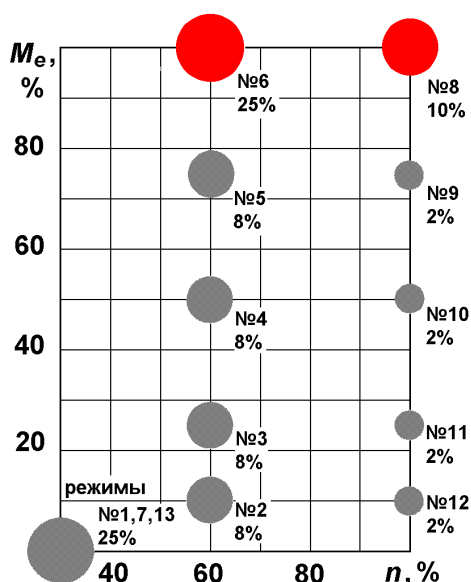


Рис. 2. Испытательный 13-режимный цикл *ECE R49* для оценки токсичности ОГ дизелей в стендовых условиях. Около точки каждого режима указаны номер режима и доля этого режима в общем объеме времени работы; красным цветом выделены режимы максимальной мощности (№ 8) и максимального крутящего момента (№ 6)

По приведенным на рис. 3,б,в,г характеристикам содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов с использованием общепринятых методик рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы на режимах 13-режимного цикла по формулам [3]:

$$e_{\text{NO}_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{NO}_x i} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad e_{\text{CO}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{CO} i} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad e_{\text{CH}_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{CH} i} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}. \quad (1)$$

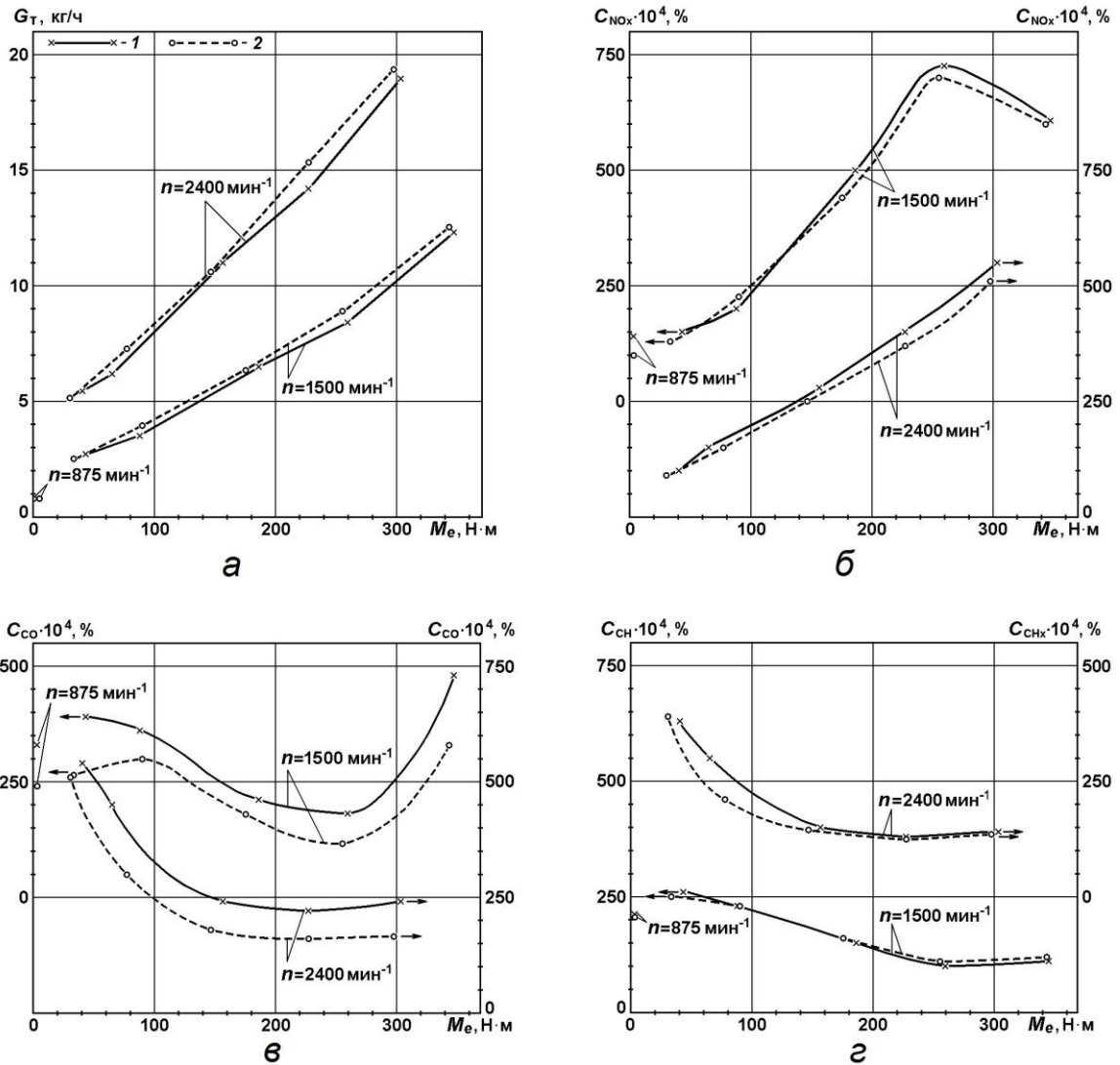


Рис. 3. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$  (б), монооксида углерода  $C_{\text{CO}}$  (в) и несгоревших углеводородов  $C_{\text{CH}}$  (г) от частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$  дизеля Д-245.12С: 1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ

С использованием представленных на рис. 3,а характеристик часового расхода топлива  $G_T$  определены значения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  и эффективного КПД  $\eta_e$ . Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-режимного цикла проведена по среднему (условному) удельному эффективному расходу топлива  $g_{e \text{ усл}}$  и условному эффективному КПД  $\eta_{e \text{ усл}}$ , которые определялись с использованием зависимостей [3]:

$$g_e = \frac{1000 G_T}{N_e}; \quad \eta_e = \frac{3600}{H_U g_e}, \quad g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{Ti} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad \eta_{e \text{ усл}} = \frac{3600}{H_U g_{e \text{ усл}}}. \quad (2)$$

где  $G_{Ti}$  – часовой расход топлива на  $i$ -м режиме;  $H_U$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг. Приведенные в табл. 2 результаты расчетов подтверждают возможность заметного улучшения экологических показателей дизеля типа Д-245.12С при его переводе с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ. Вместе с тем определенный интерес представляет вопрос о влиянии состава смесового биотоплива на характеристики дизеля. С этой целью проведены исследования дизеля на чистом ДТ и смесовом биотопливе, содержащем от 0 до 60 % МЭРМ (табл. 2 и рис. 4).

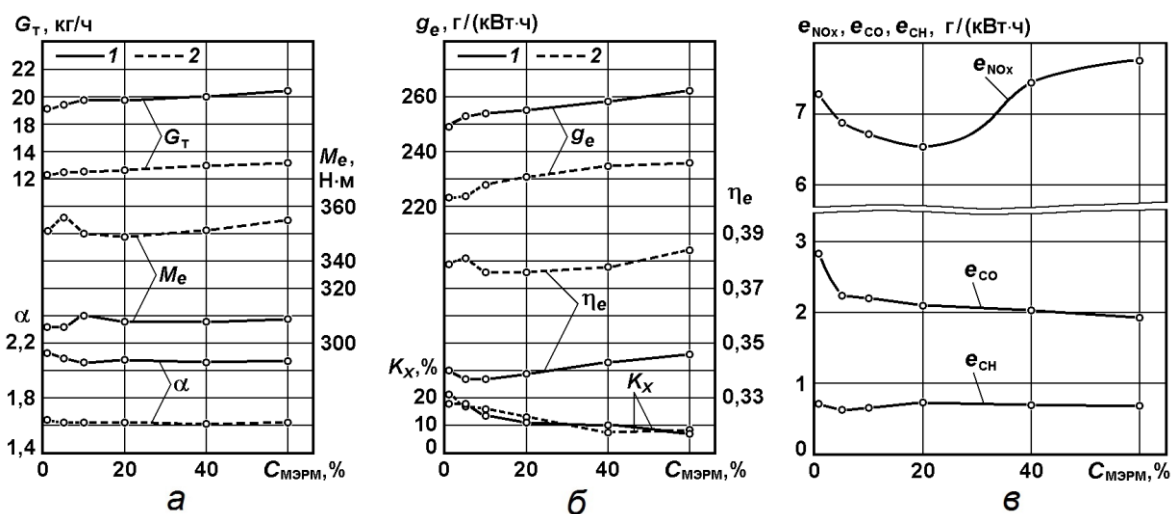


Рис. 4. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$ , крутящего момента  $M_e$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на режимах ВСХ (а), удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_x$  на режимах ВСХ (б), удельных массовых выбросов оксидов азота  $e_{NOx}$ , монооксида углерода  $e_{CO}$  и углеводородов  $e_{CH}$  с ОГ на режимах 13-режимного цикла (в) дизеля Д-245.12С от содержания МЭРМ в смесовом биотопливе  $C_{MЭРМ}$ : 1 – на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 – на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$

В условиях европейской части России привлекательным представляется производство и использование в качестве моторного топлива метилового эфира подсолнечного масла (МЭПМ). Для подтверждения возможности использования этих смесей в качестве моторного топлива проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С. При испытаниях использовано

дизельное топливо марки «Л» по ГОСТ 305-82 и его смеси с МЭПМ, содержащие которого изменялось в диапазоне от 0 до 40 % (табл. 3).

Таблица 3. Физико-химические свойства смесей нефтяного ДТ и МЭПМ

| Свойства                                                      | Топлива |        |                        |                         |                         |                         |                         |
|---------------------------------------------------------------|---------|--------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                                               | ДТ      | МЭПМ   | 95% ДТ<br>+ 5%<br>МЭПМ | 90% ДТ<br>+ 10%<br>МЭПМ | 85% ДТ<br>+ 15%<br>МЭПМ | 80% ДТ<br>+ 20%<br>МЭПМ | 60% ДТ<br>+ 40%<br>МЭПМ |
| Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>                        | 830     | 886    | 832,8                  | 835,6                   | 838,4                   | 841,2                   | 852,4                   |
| Вязкость кинематическая при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с         | 3,8     | 7,0    | 4,0                    | 4,2                     | 4,3                     | 4,4                     | 5,0                     |
| Теплота сгорания низшая, кДж/кг                               | 42 500  | 37 200 | 42 200                 | 41 900                  | 41 700                  | 41 400                  | 40 400                  |
| Цетановое число                                               | 45      | 47     | –                      | –                       | –                       | –                       | –                       |
| Температура помутнения, °С                                    | –25     | –13    | –                      | –                       | –                       | –                       | –                       |
| Температура застывания, °С                                    | –35     | –17    | –                      | –                       | –                       | –                       | –                       |
| Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг | 14,30   | 12,53  | 14,23                  | 14,11                   | 14,03                   | 13,96                   | 13,59                   |
| Содержание, % по массе                                        |         |        |                        |                         |                         |                         |                         |
| С                                                             | 87,0    | 76,7   | 86,5                   | 86,0                    | 85,5                    | 85,0                    | 82,9                    |
| Н                                                             | 12,6    | 12,2   | 12,6                   | 12,5                    | 12,5                    | 12,5                    | 12,4                    |
| О                                                             | 0,4     | 11,1   | 0,9                    | 1,5                     | 2,0                     | 2,5                     | 4,7                     |

Примечание: «–» – свойства не определялись; для смесей указано объемное процентное содержание компонентов.

На первом этапе исследований проведены испытания дизеля Д-245.12С на чистом ДТ и на смеси 80 % ДТ и 20 % МЭПМ на режимах ВСХ (рис. 5 и табл. 4). На втором этапе дизель испытывался на этих топливах на 13-режимном испытательном цикле *ECE R49* (рис. 6 и табл. 4). Представленные результаты испытаний дизеля Д-245.12С дополнены результатами аналогичных испытаний и на смесях ДТ и МЭПМ другого состава – с объемным содержанием МЭПМ в смеси от 0 до 40 % (рис. 7 и табл. 4).

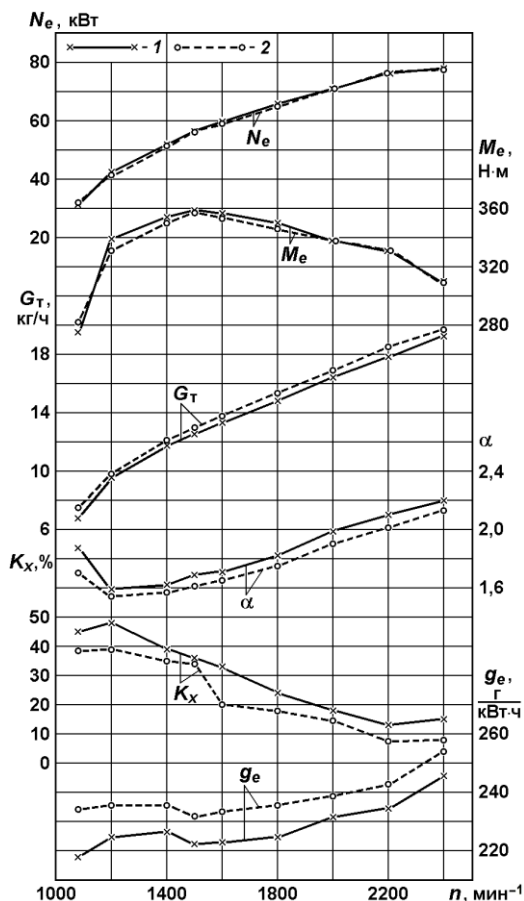


Рис. 5. Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , часового расхода топлива  $G_t$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах ВСХ: 1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭПМ

Таблица 4. Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на смесях нефтяного ДТ и МЭПМ

| Показатели дизеля                                      | Вид топлива |                        |                         |                         |                         |                         |
|--------------------------------------------------------|-------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                                        | ДТ          | 95% ДТ<br>+ 5%<br>МЭПМ | 90% ДТ<br>+ 10%<br>МЭПМ | 85% ДТ<br>+ 15%<br>МЭПМ | 80% ДТ<br>+ 20%<br>МЭПМ | 60% ДТ<br>+ 40%<br>МЭПМ |
| Часовой расход топлива $G_t$ , кг/ч:                   |             |                        |                         |                         |                         |                         |
| - на режиме максимальной мощности                      | 19,23       | 19,20                  | 19,49                   | 19,47                   | 19,71                   | 20,07                   |
| - на режиме максимального крутящего момента            | 12,51       | 12,54                  | 12,81                   | 12,85                   | 12,98                   | 13,14                   |
| Крутящий момент дизеля $M_e$ , Н·м:                    |             |                        |                         |                         |                         |                         |
| - на режиме максимальной мощности                      | 310         | 306                    | 313                     | 307                     | 309                     | 311                     |
| - на режиме максимального крутящего момента            | 359         | 356                    | 355                     | 353                     | 357                     | 357                     |
| Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч): |             |                        |                         |                         |                         |                         |
| - на режиме максимальной мощности                      | 246,6       | 249,8                  | 247,8                   | 252,6                   | 254,0                   | 257,0                   |
| - на режиме максимального крутящего момента            | 222,1       | 224,4                  | 229,7                   | 231,8                   | 231,8                   | 234,5                   |
| Эффективный КПД дизеля $\eta_e$ :                      |             |                        |                         |                         |                         |                         |
| - на режиме максимальной мощности                      | 0,343       | 0,342                  | 0,347                   | 0,342                   | 0,342                   | 0,347                   |
| - на режиме максимального крутящего момента            | 0,381       | 0,380                  | 0,374                   | 0,372                   | 0,375                   | 0,380                   |
| Дымность ОГ $K_x$ , % по шкале Хартриджа:              |             |                        |                         |                         |                         |                         |
| - на режиме максимальной мощности                      | 15,0        | 13,0                   | 10,0                    | 10,0                    | 8,0                     | 6,0                     |
| - на режиме максимального крутящего момента            | 36,0        | 37,0                   | 36,0                    | 35,0                    | 34,0                    | 25,0                    |
| Интегральные на режимах 13-режимного цикла:            | 241,32      | 250,40                 | 251,31                  | 252,75                  | 255,07                  | 258,49                  |

|                                                                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| - эффективный расход топлива $g_{e \text{ усл.}}$ , г/(кВт·ч)                    | 0,351 | 0,341 | 0,342 | 0,342 | 0,341 | 0,345 |
| - эффективный КПД $\eta_{e \text{ усл.}}$                                        |       |       |       |       |       |       |
| Интегральные на режимах 13-режимного цикла удельные массовые выбросы, г/(кВт·ч): |       |       |       |       |       |       |
| - оксиды азота $e_{\text{NOx}}$                                                  | 5,948 | 5,905 | 5,894 | 5,724 | 5,718 | 5,742 |
| - монооксид углерода $e_{\text{CO}}$                                             | 2,782 | 2,767 | 2,428 | 2,288 | 2,171 | 1,949 |
| - несгоревшие углеводороды $e_{\text{CHx}}$                                      | 1,006 | 0,924 | 0,829 | 0,821 | 0,813 | 0,784 |

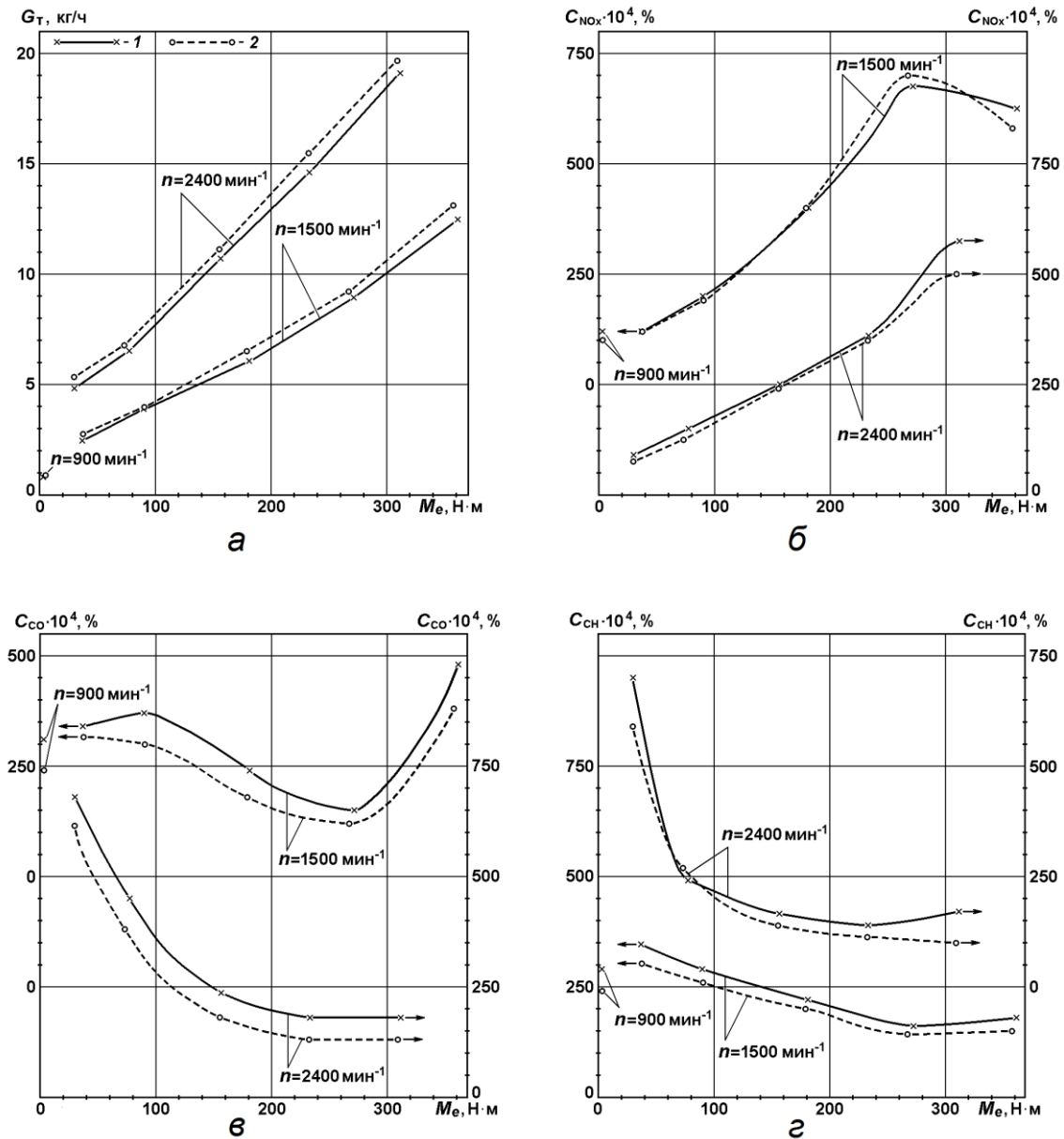


Рис. 6. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$  (б), монооксида углерода  $C_{\text{CO}}$  (в) и несгоревших углеводородов  $C_{\text{CHx}}$  (г) от частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$  дизеля Д-245.12С: 1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭПМ

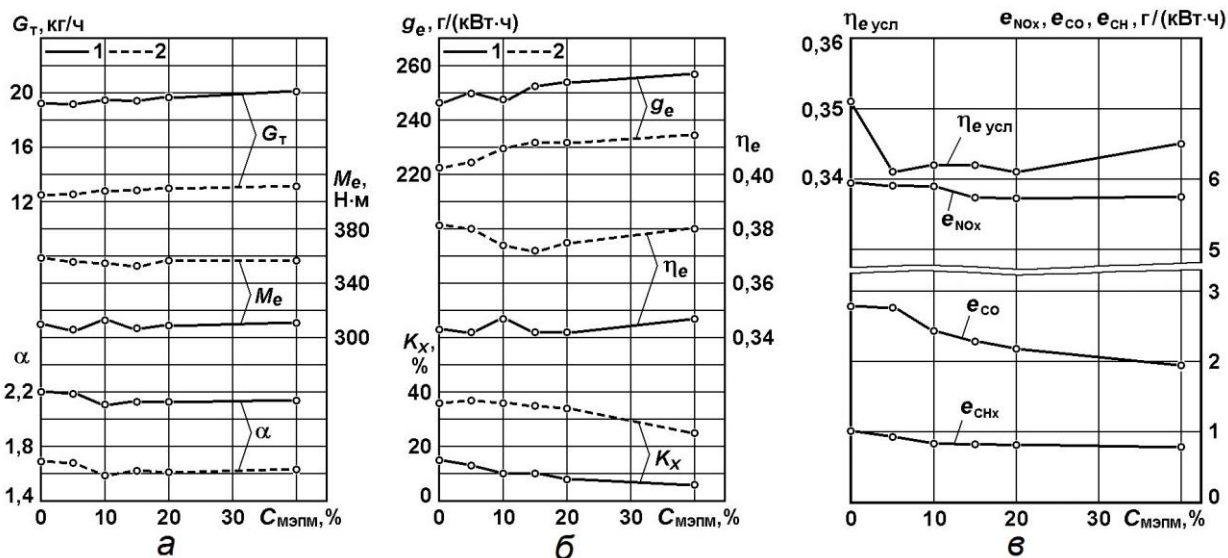


Рис. 7. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$ , крутящего момента  $M_e$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на режимах ВСХ (а), удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_x$  на режимах ВСХ (б), условного эффективного КПД  $\eta_{e\text{ усл}}$  и удельных массовых выбросов оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$ , монооксида углерода  $e_{\text{CO}}$  и углеводородов  $e_{\text{CH}_x}$  с ОГ на 13-режимном цикле (в) дизеля Д-245.12С от содержания МЭПМ в смеси  $C_{\text{МЭПМ}}$ : 1 – на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 – на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$

## МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА

Проведенные экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С на смесях нефтяного ДТ с МЭРМ и МЭПМ подтвердили возможность значительного улучшения экологических показателей дизеля, а также целесообразность оптимизации состава указанных смесевых биотоплив. Задача выбора оптимального состава таких смесей является многокритериальной оптимизационной задачей [5, 6]. При оптимизации их состава учитывалось, что топливная экономичность исследуемого дизеля слабо зависит от состава биотоплива. Из нормируемых токсичных компонентов ОГ дизелей наиболее значимыми являются оксиды азота  $\text{NO}_x$  и сажа С (дымность ОГ) [5]. Причем, наиболее значимыми режимами используемого при испытаниях дизеля 13-

режимного цикла *ECE R49* являются режимы максимальной мощности и максимального крутящего момента (см. рис. 2). С учетом изложенных факторов для решения задачи оптимизации состава смесевого биотоплива для дизеля Д-245.12С предложено использовать метод свертки. При этом частные критерии оптимальности сводятся к обобщенному критерию  $J_o$ , определяемому в виде суммы основных частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ оксидов азота  $J_{NO_x}$  и дымность ОГ по шкале Хартриджа  $J_{K_x}$ , в соответствии с формулой

$$J_o = J_{NO_x N_{max}} + J_{NO_x M_{max}} + J_{K_x N_{max}} + J_{K_x M_{max}}, \quad (1)$$

где  $J_{NO_x N_{max}}$ ,  $J_{NO_x M_{max}}$ ,  $J_{K_x N_{max}}$ ,  $J_{K_x M_{max}}$  – частные критерии оптимальности (концентрация в ОГ оксидов азота и дымность ОГ по шкале Хартриджа) на указанных режимах. Поскольку в качестве частных критериев оптимальности выражения (1) использованы концентрация в ОГ оксидов азота  $C_{NO_x}$  и дымность ОГ по шкале Хартриджа  $K_x$ , имеющие различную размерность, целесообразно их использование в относительных величинах в следующем виде:

$$\begin{aligned} J_{NO_x N_{max}} &= C_{NO_x N_{max} i} / C_{NO_x N_{max} ДТ}; & J_{NO_x M_{max}} &= C_{NO_x M_{max} i} / C_{NO_x M_{max} ДТ}; \\ J_{K_x N_{max}} &= K_{x N_{max} i} / K_{x N_{max} ДТ}; & J_{K_x M_{max}} &= K_{x M_{max} i} / K_{x M_{max} ДТ}, \end{aligned} \quad (2)$$

где параметры с индексом «ДТ» соответствуют работе на нефтяном ДТ, а параметры с индексом «i» – работе на смеси *i*-го состава. Обобщенный критерий оптимальности (1) использован и в относительном виде:

$$\bar{J}_o = J_{oi} / J_{oДТ}. \quad (3)$$

Таким образом, предложенная методика оптимизации смесевого биотоплива предполагает формирование обобщенного аддитивного критерия оптимальности в виде (1) или (3). Минимум этого обобщенного критерия соответствует оптимальному составу смесевого биотоплива. При оптимизации состава смесей нефтяного ДТ с МЭРМ и МЭПМ использованы представленные выше экспериментальные данные по дизелю Д-245.12С, работающему на смесях ДТ с МЭРМ и МЭПМ. Результаты проведенных расчетных исследований сведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты оптимизации состава смесей нефтяного ДТ с метиловыми эфирами растительных масел для дизеля Д-245.12С

| Вид топлива                                                                      | Показатели дизеля     |                 |                       |                 |                   |                |                   |                |       |             |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------|-------------|
|                                                                                  | $C_{NOx\ Nmax}$ , ppm | $J_{NOx\ Nmax}$ | $C_{NOx\ Mmax}$ , ppm | $J_{NOx\ Mmax}$ | $K_{x\ Nmax}$ , % | $J_{Kx\ Nmax}$ | $K_{x\ Mmax}$ , % | $J_{Kx\ Mmax}$ | $J_o$ | $\bar{J}_o$ |
| <i>Смеси нефтяного дизельного топлива с метиловым эфиром рапсового масла</i>     |                       |                 |                       |                 |                   |                |                   |                |       |             |
| ДТ                                                                               | 550                   | 1,000           | 610                   | 1,000           | 18,0              | 1,000          | 21,0              | 1,000          | 4,000 | 1,000       |
| 95% ДТ+5% МЭРМ                                                                   | 550                   | 1,000           | 650                   | 1,066           | 18,0              | 1,000          | 17,0              | 0,810          | 3,876 | 0,969       |
| 90% ДТ+10% МЭРМ                                                                  | 500                   | 0,909           | 675                   | 1,107           | 13,5              | 0,750          | 16,0              | 0,762          | 3,528 | 0,882       |
| 80% ДТ+20% МЭРМ                                                                  | 510                   | 0,927           | 600                   | 0,984           | 11,0              | 0,611          | 13,0              | 0,619          | 3,141 | 0,785       |
| 60% ДТ+40% МЭРМ                                                                  | 575                   | 1,045           | 635                   | 1,041           | 10,0              | 0,556          | 7,5               | 0,357          | 2,999 | 0,750       |
| 40% ДТ+60% МЭРМ                                                                  | 575                   | 1,045           | 700                   | 1,148           | 7,0               | 0,389          | 8,5               | 0,405          | 2,987 | 0,747       |
| <i>Смеси нефтяного дизельного топлива с метиловым эфиром подсолнечного масла</i> |                       |                 |                       |                 |                   |                |                   |                |       |             |
| ДТ                                                                               | 575                   | 1,000           | 625                   | 1,000           | 15,0              | 1,000          | 36,0              | 1,000          | 4,000 | 1,000       |
| 95% ДТ+5% МЭПМ                                                                   | 550                   | 0,957           | 600                   | 0,960           | 13,0              | 0,867          | 37,0              | 1,028          | 3,812 | 0,953       |
| 90% ДТ+10% МЭПМ                                                                  | 515                   | 0,896           | 590                   | 0,944           | 10,0              | 0,667          | 36,0              | 1,000          | 3,507 | 0,877       |
| 85% ДТ+15% МЭПМ                                                                  | 500                   | 0,870           | 580                   | 0,928           | 10,0              | 0,667          | 35,0              | 0,972          | 3,437 | 0,859       |
| 80% ДТ+20% МЭПМ                                                                  | 500                   | 0,870           | 580                   | 0,928           | 8,0               | 0,533          | 34,0              | 0,944          | 3,275 | 0,819       |
| 60% ДТ+40% МЭПМ                                                                  | 515                   | 0,896           | 600                   | 0,960           | 6,0               | 0,400          | 25,0              | 0,694          | 2,950 | 0,738       |

В соответствии с данными табл. 5 все рассматриваемые смесевые биотоплива заметно улучшают показатели токсичности ОГ дизеля Д-245.12С. Причем с увеличением содержания МЭРМ ( $C_{МЭРМ}$ ) и МЭПМ ( $C_{МЭПМ}$ ) в смесях с нефтяным ДТ обобщенный критерий оптимальности  $\bar{J}_o$  монотонно уменьшается (рис. 8). С точки зрения обобщенного критерия  $\bar{J}_o$  предложенной методики наилучшие результаты достигнуты при использовании смесей 40%ДТ+60%МЭРМ ( $\bar{J}_o=0,747$ ) и 60%ДТ+40%МЭПМ ( $\bar{J}_o=0,738$ ).

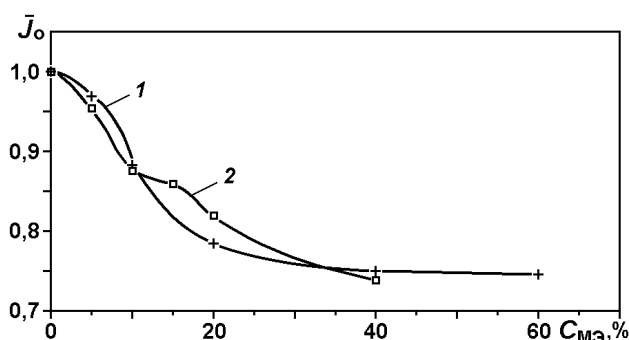


Рис. 8. Зависимость критерия оптимальности  $\bar{J}_o$  от содержания метилового эфира растительного масла в смеси ДТ  $C_M$ : 1 – ДТ + МЭРМ; 2 – ДТ + МЭПМ

Перевод дизеля Д-245.12С с нефтяного ДТ на первую из упомянутых смесей – смесь 40 % ДТ и 60 % МЭРМ на режиме максимальной мощности сопровождался снижением дымности ОГ  $K_x$  от 18,0 до 7,0 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента – от 21,0 до 8,5 %. При этом интегральный на режимах 13-режимного цикла удельный массовый выброс оксидов азота  $e_{NOx}$  возрос с 7,286 до 7,759 г/(кВт·ч), выброс моноок-

сида углерода  $e_{CO}$  снизился с 2,834 до 1,932 г/(кВт·ч), выброс углеводородов  $e_{CHx}$  уменьшился с 0,713 до 0,681 г/(кВт·ч). Перевод дизеля с нефтяного ДТ на вторую из упомянутых смесей – смесь 60 % ДТ и 40 % МЭПМ на режиме максимальной мощности привел к снижению дымности ОГ  $K_x$  от 15,0 до 6,0 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента – от 36,0 до 25,0 %. При этом интегральный выброс оксидов азота  $e_{NOx}$  снизился с 5,949 до 5,742 г/(кВт·ч), выброс монооксида углерода  $e_{CO}$  – с 2,782 до 1,949 г/(кВт·ч), выброс углеводородов  $e_{CHx}$  – от 1,006 до 0,784 г/(кВт·ч).

Согласно рис. 8, близкий характер протекания двух полученных характеристик  $\bar{J}_O = f(C_{MЭРМ})$  и  $\bar{J}_O = f(C_{MЭПМ})$  подтверждает близкие экологические качества этих двух видов биотоплив. Уменьшение значений  $\bar{J}_O$  по мере увеличения  $C_{MЭ}$  (рис. 8) свидетельствует о том, что даже небольшая добавка МЭРМ и МЭПМ в нефтяное ДТ значительно улучшает показатели токсичности ОГ исследуемого дизеля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Проведенные испытания дизеля Д-245.12С подтвердили возможность значительного улучшения показателей токсичности его ОГ при работе на смесях ДТ и МЭРМ, ДТ и МЭПМ.
- Разработана методика оптимизации состава указанных смесей, базирующаяся на составлении обобщенного критерия оптимальности в виде суммы частных критериев, характеризующих содержание в ОГ оксидов азота и сажи, на двух основных режимах – максимальной мощности и максимального крутящего момента.
- Полученные результаты оптимизации подтверждает близкие экологические качества смесей ДТ с МЭРМ и МЭПМ.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Александров А.А., Архаров И.А., В.В. Багров, Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Девянин С.Н., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Альтернативные*

*топлива для двигателей внутреннего сгорания* / Под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. Москва: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. 791 с.

[2] Васильев И.П. *Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля*. Луганск: Изд-во Восточноукраинского университета им. В. Даля, 2009. 240 с.

[3] Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г., Шахов А.В., Багров В.В. *Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях*. Москва: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 536 с.

[4] Knothe G., Van Gerpen J., Krahл J. et al. *The Biodiesel Handbook*. Shampaign, Illinois: AOCS Press, 2005. 286 p.

[5] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.

[6] Васильев Ф.П. *Методы оптимизации*. Москва: Факториал Пресс, 2002. 824 с.