

**Михайлов Алексей, 11 класс, ГБОУ лицей 1575.  
Научный руководитель Марков В.А., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана**

**Проект- призёр научно-образовательного соревнования МГТУ им. Н.Э. Баумана «Шаг в будущее, Москва-2014», по защите проекта и олимпиаде по физике учащийся поступил в МГТУ на факультет Э ( энергетические системы будущего)**

### **Кукурузное масло как экологическая добавка к дизельному топливу**

В настоящее время все более острой становится проблема замещения нефтяных моторных топлив альтернативными топливами [1, 2]. Это обусловлено, с одной стороны, удорожанием нефтяных моторных топлив и их нарастающим дефицитом, а с другой стороны – необходимостью решения острых экологических проблем крупных мегаполисов и населенных пунктов сельской местности. При этом, как правило, предпочтение отдается топливам, производимым из возобновляемых сырьевых ресурсов, – биотопливам, производимым из растительного сырья. Применительно к дизельным двигателям наиболее перспективными считаются биотоплива, получаемым из растительных масел. Эти топлива находят все большее применение в сельскохозяйственной технике, на транспорте, в стационарных установках [3, 4, 5].

Для получения таких биотоплив могут быть использованы различные растительные масла – соевое, рапсовое, пальмовое и др. [6]. В Российской Федерации самым распространенным видом растительного масла, и его производство продолжает расширяться. В 2007 году в России произведено около 2,7 млн. тонн растительных масел, из них на долю подсолнечного масла приходилось более 90%. В 2012 году производство растительных масел составило приблизительно 4,2 млн. тонн, а подсолнечного масла – около 3,6 млн. тонн (рис. 1 и табл. 1). В 2008 году посевные площади под подсолнечником в России достигли уровня 6,17 млн. га, а валовый сбор маслосемян составил 7,22 млн. тонн. При этом общемировая посевная площадь подсолнечника равна около 14 млн. га. С одного гектара посевов подсолнечника получают около 1000 л подсолнечного масла. Это растительное масло вызывает дополнительный интерес еще и потому, что производство биодизельного топлива может быть организовано из отработанного фритюрного подсолнечного масла, используемого в пищевой промышленности и системе общественного питания. По данным работы [7] в Японии ежегодные отходы фритюрных масел составляют от 400 до 600 тысяч тонн в год. Сопоставимый объем отходов фритюрных масел характерен и для России.

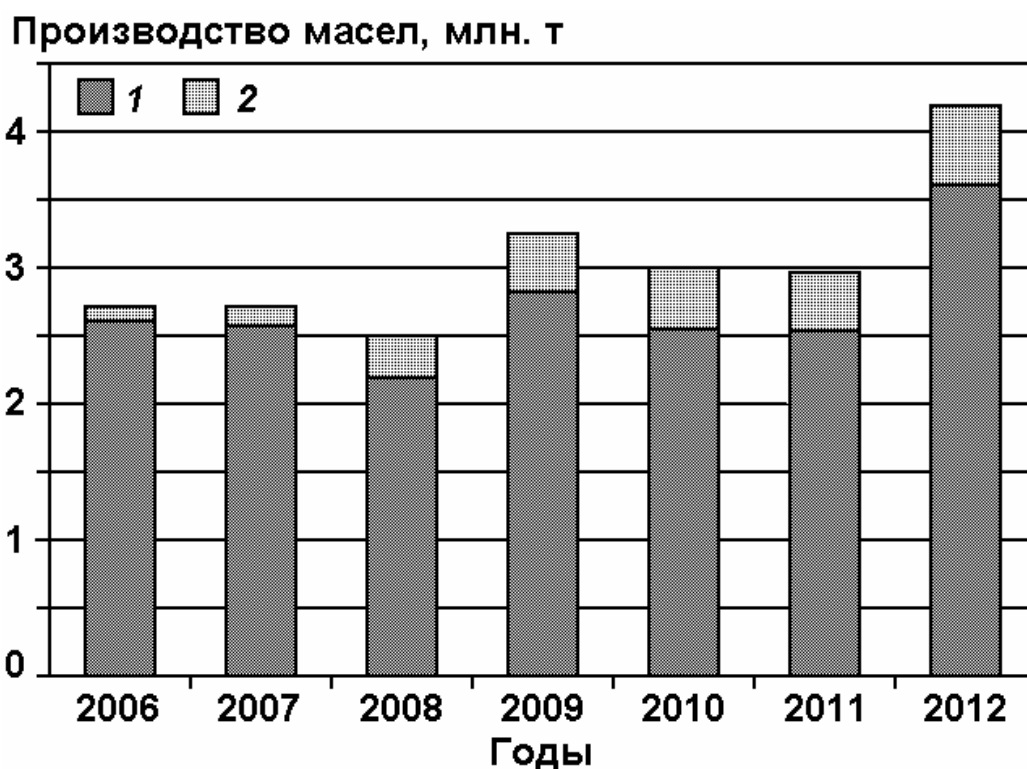


Рис. 1. Динамика изменения объемов производства растительных масел в России: 1 – подсолнечное масло; 2 – прочие растительные масла

Таблица 1. Доля различных растительных масел в общем объеме их производства в России в 2012 году

| Тип растительного масла | Доля в общем объеме производства, % |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Подсолнечное            | 86,84                               |
| Соевое                  | 7,96                                |
| Рапсовое                | 4,84                                |
| Горчичное               | 0,11                                |
| Кукурузное              | 0,04                                |
| Льняное                 | 0,03                                |
| Прочие                  | 0,18                                |

Примечание: к прочим маслам относятся арахисовое, оливковое, сафлоровое, хлопковое, сурепное и иные масла

Для централизованного снабжения мегаполисов моторными топливами в наибольшей степени подходят сложные эфиры растительных масел (их называют также биодизельным топливом) – они имеют физико-химические свойства, достаточно близкие к свойствам нефтяных дизельных топлив (ДТ). Кроме того, эти эфиры хорошо смешиваются с нефтепродуктами, что позво-

ляет получать стойкие смеси, отличающиеся к тому же хорошими экологическими характеристиками.

Возможность использования растительных масел и их эфиров в качестве моторного топлива предопределяется их физико-химическими свойствами. Жирные кислоты, являющиеся основным компонентом растительных масел, представляют собой высокомолекулярные кислородсодержащие соединения с углеводородным основанием [8, 9]. По своей химической структуре они схожи с углеводородами, входящим в состав нефтяного дизельного топлива. В свою очередь, структурные формулы метиловых эфиров жирных кислот и самих жирных кислот также достаточно близки. Структура жирной кислоты отлична от структуры углеводорода замещением углеводородного радикал  $\text{CH}_3$  карбоксильной группой  $\text{COOH}$ . Структурные формулы углеводорода и эфира отличаются тем, что метиловый радикал  $\text{CH}_3$  замещен группой  $\text{CO-OCH}_3$ . Указанные особенности химической структуры жирных кислот и их эфиров обуславливают отличия физико-химических свойств биотоплив и традиционных ДТ.

Вместе с тем, поскольку структурные формулы жирных кислот растительных масел и углеводородов дизельного топлива подобны, все растительные масла являются горючими и могут применяться в качестве моторных топлив. Низкая испаряемость и высокая вязкость растительных масел исключают их использование в бензиновых двигателях. Но они могут успешно применяться в качестве топлива для дизельных двигателей. Этому способствуют сравнительно невысокая термическая стабильность растительных масел и приемлемая температура их самовоспламенения, равная  $t_{\text{св}}=280-320$  °С и лишь немного превышающая температуру самовоспламенения дизельных топлив ( $t_{\text{св}}=230-300$  °С). При этом цетановое число (ЦЧ) различных растительных масел изменяется в пределах от 33 до 50 единиц (см. табл. 2), что сопоставимо с цетановым числом дизельных топлив (ЦЧ=40-55) [6].

Таблица 2. Физико-химические свойства растительных масел

| Физико-химические свойства                                     | Масла    |              |        |           |           |           |            |
|--|----------|--------------|--------|-----------|-----------|-----------|------------|
|  | рапсовое | подсолнечное | соевое | пальмовое | оливковое | хлопковое | арахисовое |
| Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>                         | 916      | 923          | 924    | 918       | 914       | 919       | 917        |
| Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с при:               |          |              |        |           |           |           |            |
|  | 20 °С    | 75,0         | 65,2   | -         | -         | -         | 81,5       |
|  | 40 °С    | 36,0         | 30,7   | 32,0      | -         | -         | 36,5       |
| 100 °С   | 8,1      | 7,4          | 7,7    | 8,6       | 8,4       | 7,7       | 8,3        |
| Цетановое число  | 36       | 33           | 50     | 49        | -         | -         | 37         |
| Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг | 12,6     | 12,4         | 12,4   | 12,6      | -         | 12,4      | 12,8       |
| Теплота сгорания низшая, $H_u$ , МДж/кг                        | 37,3     | 37,0         | 36-39  | 37,1      | -         | -         | 37,0       |

|  |       |      |      |      |      |      |      |
|--|-------|------|------|------|------|------|------|
| Температура самовоспламенения, °С          | 318   | 320  | 318  | 315  | 285  | 316  | -    |
| Температура застывания, °С                 | -20   | -16  | -12  | +30  | -12  | -18  | -    |
| Содержание серы, % (масс.)                 | 0,002 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Содержание, % по массе                     |       |      |      |      |      |      |      |
| С  | 78,0  | 77,6 | 77,5 | 77,6 | -    | 77,1 | 78,0 |
| Н  | 10,0  | 11,5 | 11,5 | 12,0 | -    | 11,7 | 12,3 |
| О  | 12,0  | 10,9 | 11,0 | 11,4 | -    | 11,2 | 9,7  |
| Кислотность, мг КОН / 100 мл топлива       | 4,66  | 2,14 | 0,03 | 0,17 | 5,90 | 0,23 | -    |
| Коксуемость 10 %-ного остатка, %, не более | 0,40  | 0,51 | 0,44 | -    | 0,20 | 0,23 | -    |

Примечание: «-» - свойства не определялись

Отличительной особенностью МЭПМ является его более тяжелый фракционный состав, о чем свидетельствуют представленные на рис. 2 кривые фракционной разгонки этого эфира и базового дизельного топлива [10]. Если исследуемое в работе [10] базовое ДТ выкипает в пределах от 190 до 340 °С, то МЭПМ имеет диапазон температур перегонки от 310 до 360 °С. Поэтому МЭПМ отличается от ДТ заметно большими плотностью и вязкостью. Указанные отличия физических свойств МЭПМ, а также его смесей с ДТ, от свойств нефтяного ДТ оказывают влияние на параметры процесса топливоподачи, и, следовательно, на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля, работающего на указанных топливах.

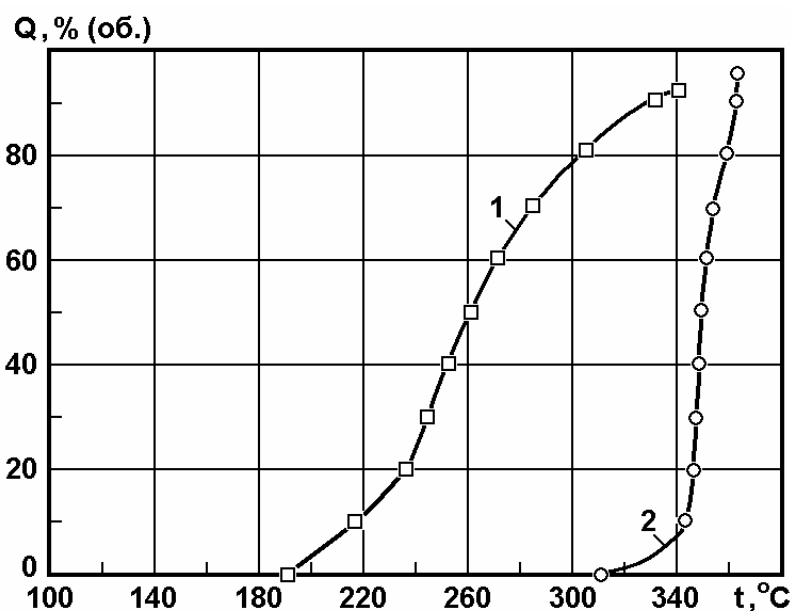


Рис. 2. Зависимость количества испарившегося топлива от температуры разгонки: 1 – базовое ДТ; 2 – МЭПМ

Известно ряд работ, посвященных исследованию дизелей, работающих на метиловом эфире подсолнечного масла и его смесях с дизельным топли-

вом (ДТ) [11, 12, 13, 14]. Вместе с тем, вопрос о применении смесей МЭПМ и ДТ в качестве топлива для отечественных транспортных дизелей является недостаточно изученным. Для подтверждения возможности использования этих смесей в качестве моторного топлива проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С (4ЧН 11/12,5), устанавливаемого на малотоннажные грузовые автомобили ЗиЛ-5301 «Бычок». Описание исследуемого дизеля и моторного стенда приведено в работе [15].

Дизель исследован на моторном стенде АМО «ЗиЛ» на режимах внешней скоростной характеристики и режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН с установочным УОВТ  $\theta=13^\circ$  поворота коленчатого вала до ВМТ и неизменным положением упора дозирующей рейки (упора максимальной подачи топлива). Моторный стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы *Hartridge* (Великобритания) с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ . Концентрации  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  в ОГ определялись газоанализатором SAE-7532 японской фирмы *Yanaco* с погрешностями измерения указанных компонентов  $\pm 1\%$ .

Исследовались товарное дизельное топливо и его смеси с метиловым эфиром подсолнечного масла, содержащие от 5% до 40% МЭПМ. Исследуемый МЭПМ был произведен во Всероссийском научно-исследовательском институте использования техники и нефтепродуктов Россельхозакадемии (ГНУ «ВНИИТиН», г. Тамбов). Некоторые физико-химические свойства дизельного топлива, МЭПМ и указанных смесей представлены в табл. 3.

Таблица 3. Физико-химические свойства исследуемых топлив

| Физико-химические свойства                                     | Топлива |       |                 |                  |                  |                  |                  |
|--|---------|-------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|  | ДТ      | МЭПМ  | 95% ДТ+ 5% МЭПМ | 90% ДТ+ 10% МЭПМ | 85% ДТ+ 15% МЭПМ | 80% ДТ+ 20% МЭПМ | 60% ДТ+ 40% 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                                | 42500   | 37200 | 42200           | 41900            | 41700            | 41400            | 40400            |
| Цетановое число  | 45      | 47    | -               | -                | -                | -                | -                |
| Температура помутнения, °С                                     | -25     | -13   | -               | -                | -                | -                | -                |
| Температура застывания, °С                                     | -35     | -17   | -               | -                | -                | -                | -                |
| Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, 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  |
| Общее содержание серы, % по массе         | 0,20 | 0,002 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,12 |
| Коксуемость 10 %-ного остатка, % по массе | 0,20 | 0,30  | 0,21 | 0,21 | 0,22 | 0,22 | 0,24 |

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

На первом этапе исследований проведены испытания дизеля Д-245.12С на чистом дизельном топливе и на смеси 80% ДТ и 20% МЭПМ на режимах внешней скоростной характеристики. Результаты этих исследований представлены на рис. 4. Исследуемая смесь ДТ и МЭПМ имеет физические свойства, приближающиеся к свойствам ДТ. Но ее плотность и вязкость все-таки несколько выше аналогичных свойств ДТ (см. табл. 3). Поэтому при переходе от ДТ к этому смесевому биотопливу отмечено увеличение часового расхода топлива  $G_T$  (см. рис. 3 и табл. 4). Однако крутящий момент двигателя и его эффективная мощность изменились незначительно. В то же время, из-за наличия в молекулах МЭПМ атомов кислорода теплотворная способность смесевоего биотоплива несколько ниже теплотворной способности ДТ. Это привело к тому, что при переходе от ДТ на смесь 80% ДТ и 20% МЭПМ на режиме максимальной мощности с частотой вращения коленчатого вала  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> удельный эффективный расход топлива  $g_e$  увеличился от 246,6 до 254,0 г/(кВт·ч), а на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500$  мин<sup>-1</sup> – от 221,1 до 231,8 г/(кВт·ч). Но при этом изменения эффективного КПД дизеля  $\eta_e$  на этих режимах не превышали 1,6 % (см. табл. 4).

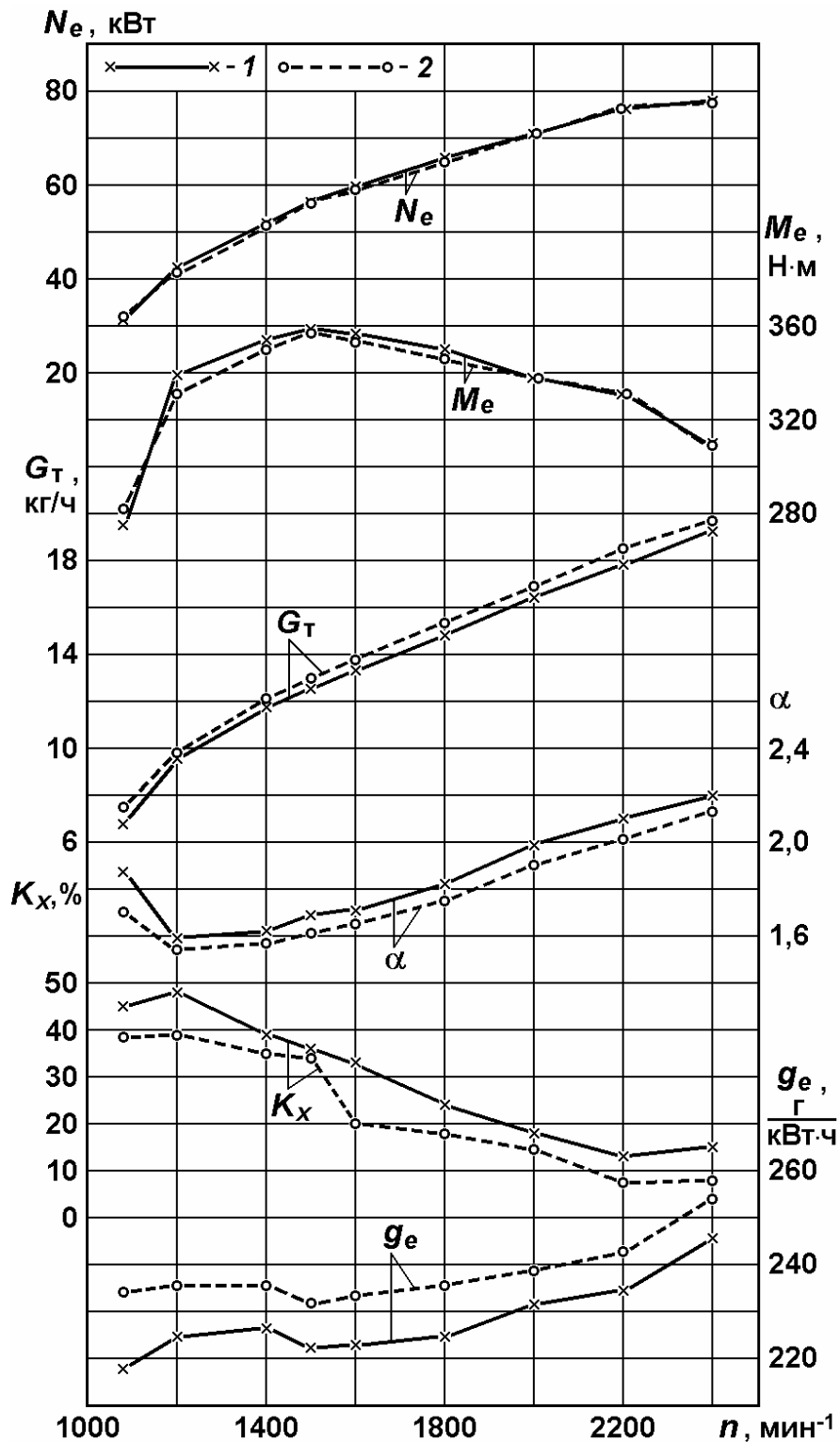


Рис. 3. Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , часового расхода топлива  $G_T$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики при использовании различных топлив: 1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ + 20 % МЭПМ

Таблица 4. Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на исследуемых топливах

| 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-ступенчатого цикла:   |             |                       |                        |                        |                        |                        |
| - эффективный расход топлива, $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)   | 241,32      | 250,40                | 251,31                 | 252,75                 | 255,07                 | 258,49                 |
| - эффективный КПД, $\eta_{e\text{ усл}}$   | 0,351       | 0,341                 | 0,342                  | 0,342                  | 0,341                  | 0,345                  |
| Интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла удельный выброс оксидов азота, $e_{\text{NO}_x}$ , г/(кВт·ч)     | 5,948       | 5,905                 | 5,894                  | 5,724                  | 5,718                  | 5,742                  |
| Интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла удельный выброс монооксида углерода, $e_{\text{CO}}$ , г/(кВт·ч) | 2,782       | 2,767                 | 2,428                  | 2,288                  | 2,171                  | 1,949                  |
| Интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла удельный выброс углеводородов, $e_{\text{СН}_x}$ , г/(кВт·ч)     | 1,006       | 0,924                 | 0,829                  | 0,821                  | 0,813                  | 0,784                  |

Наличие в молекулах МЭПМ атомов кислорода привело к заметному уменьшению дымности ОГ при работе дизеля Д-245.12 на указанной смеси. Так, на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  переход с ДТ на смесь 80% ДТ и 20% МЭПМ сопровождался снижением дымности ОГ  $K_x$  от 15,0 до 8,0% по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  – от 36,0 до 34,0% по шкале Хартриджа.

Результаты экспериментальных исследований Д-245.12С на чистом дизельном топливе и на смеси 80% ДТ и 20% МЭПМ на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН представлены на рис. 4. Как отмечено выше, использование рассматриваемого смесового биотоплива привело к некоторому увеличению часового расхода топлива  $G_T$  (см. рис. 3, 4,а и табл. 4). Так, при переводе дизеля с ДТ на смесь 80% ДТ и 20% МЭПМ на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  расход топлива



$G_T$  возрос от 19,23 до 19,71 кг/ч, а на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  – от 12,51 до 12,98 кг/ч (см. рис. 4,а и табл. 4).

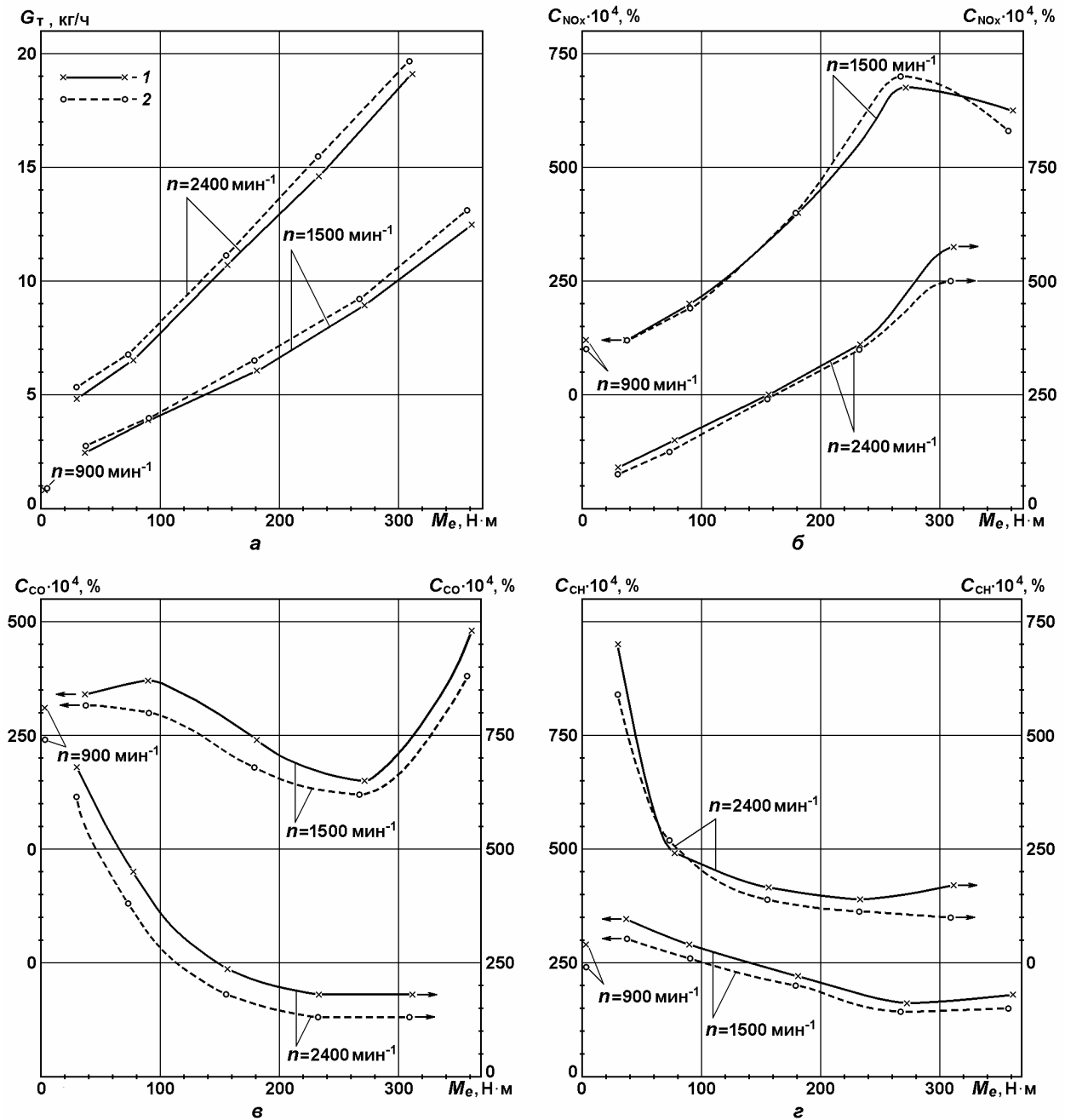


Рис. 4. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  (а), объемной концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$  (б), монооксида углерода  $C_{CO}$  (в) и несгоревших углеводородов  $C_{CH}$  (г) от частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$  дизеля Д-245.12С при использовании различных топлив: 1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ + 20 % МЭПМ

Переход от нефтяного ДТ к исследуемому смесевому биотопливу сопровождался изменением концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$  (рис. 4,б). Причем, на большинстве исследованных режимов отмечено снижение содержа-

ния оксидов азота в ОГ. Так, перевод дизеля с ДТ на смесь 80% ДТ и 20 МЭПМ на режиме холостого хода при  $n=900 \text{ мин}^{-1}$  сопровождался уменьшением концентрации  $C_{\text{NO}_x}$  от 0,0120 до 0,0100%, на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  – от 0,0625 до 0,0580%, на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  – от 0,0575 до 0,0500%.

При использовании рассматриваемого смесового биотоплива отмечено значительное снижение концентрации в ОГ монооксида углерода  $C_{\text{CO}}$  (рис. 4,б). Перевод дизеля с ДТ на смесь 80% ДТ и 20% МЭПМ на режиме холостого хода при  $n=900 \text{ мин}^{-1}$  сопровождался снижением значения  $C_{\text{CO}}$  от 0,0310 до 0,0240%, на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  – от 0,0480 до 0,0380%, а на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  – от 0,0180 до 0,0130%.

Применение смесового биотоплива позволило заметно снизить и концентрацию в ОГ несгоревших углеводородов  $C_{\text{CH}}$  (см. рис. 4,г). При переводе дизеля с ДТ на смесь 80% ДТ и 20% МЭПМ на режиме холостого хода при  $n=900 \text{ мин}^{-1}$  отмечено снижение  $C_{\text{CH}}$  от 0,0290 до 0,0240 %, на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  – от 0,0180 до 0,0150%, на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  – от 0,0170 до 0,0100%.

По приведенным на рис. 4,б,в,г характеристикам содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов (оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода  $\text{CO}$ , несгоревших углеводородов  $\text{CH}$ ) с использованием общепринятых методик рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы на режимах 13-ступенчатого цикла (соответственно  $e_{\text{NO}_x}$ ,  $e_{\text{CO}}$ ,  $e_{\text{CH}}$ ). Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-ступенчатого цикла проведена по среднему (условному) удельному эффективному расходу топлива, который определялся с использованием зависимости [6]

$$g_{\text{еусл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{\text{тi}} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{\text{ei}} \cdot K_i},$$

где  $G_{\text{тi}}$  и  $N_{\text{ei}}$  – часовой расход топлива и эффективная мощность двигателя на  $i$ -том режиме. Поскольку смесовые биотоплива имеют меньшую теплотворную способность, топливную экономичность дизеля при его работе на этих топливах целесообразно оценивать не удельным эффективным расходом топлива  $g_e$ , а эффективным КПД дизеля  $\eta_e$ . Причем, для интегральной оценки работы дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла использован условный эффективный КПД, определяемый из соотношения

$$\eta_{\text{еусл}} = \frac{3600}{H_U \cdot g_{\text{еусл}}},$$

где  $H_U$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг. Условный эффективный КПД рассчитан с использованием указанной методики и данных табл. 3 и рис. 4,а. Результаты расчетов указанных параметров представлены в табл. 4.

Приведенные в табл. 4 данные подтверждают возможность улучшения экологических показателей дизеля Д-245.12С при его переводе с ДТ на смесь 80% ДТ и 20% МЭПМ. При такой смене вида топлива отмечено заметное снижение дымности  $OG$  – на режиме максимальной мощности при  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> – на 46,7%, а на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500$  мин<sup>-1</sup> – на 5,6%. При этом интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла эффективный КПД  $\eta_{e\text{ усл}}$  снизился с 0,351 до 0,341, т.е. на 2,8%, удельный массовый выброс оксидов азота  $e_{NOx}$  уменьшился с 5,948 до 5,718 г/(кВт·ч), т.е. на 3,9%, удельный массовый выброс монооксида углерода  $e_{CO}$  снизился с 2,782 до 2,171 г/(кВт·ч), т.е. на 22,0%, а удельный массовый выброс несгоревших углеводородов  $e_{CH}$  сократился с 1,006 до 0,813 г/(кВт·ч), т.е. на 19,2% (см. табл. 4).

Представленные выше результаты исследований дизеля Д-245.12С получены при его работе на смесевом биотопливе, содержащем 80% ДТ и 20% МЭПМ. Но определенный интерес представляет вопрос о влиянии состава смесевого биотоплива на характеристики дизеля. Оценка этого влияния позволяет провести оптимизацию состава смесевого биотоплива. С этой целью проведены исследования дизеля Д-245.12С на чистом ДТ и смесевых биотопливах, содержащих до 40% (по объему) МЭПМ. Результаты этих исследований представлены на рис. 5, 6 и сведены в табл. 4.

Приведенные на рис. 5,а характеристики дизеля Д-245.12С свидетельствуют о том, что увеличение содержания МЭПМ в смесевом биотопливе  $S_{MЭПМ}$  от 0 до 40% приводит к некоторому росту часового расхода топлива  $G_T$ . Так на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500$  мин<sup>-1</sup> часовой расход топлива увеличился от 12,51 до 13,14 кг/ч, а на режиме максимальной мощности при  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> – от 19,23 до 20,07 кг/ч. Однако крутящий момент двигателя  $M_e$  и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  сравнительно слабо зависят от концентрации  $S_{MЭПМ}$  во всем исследованном диапазоне ее изменения.

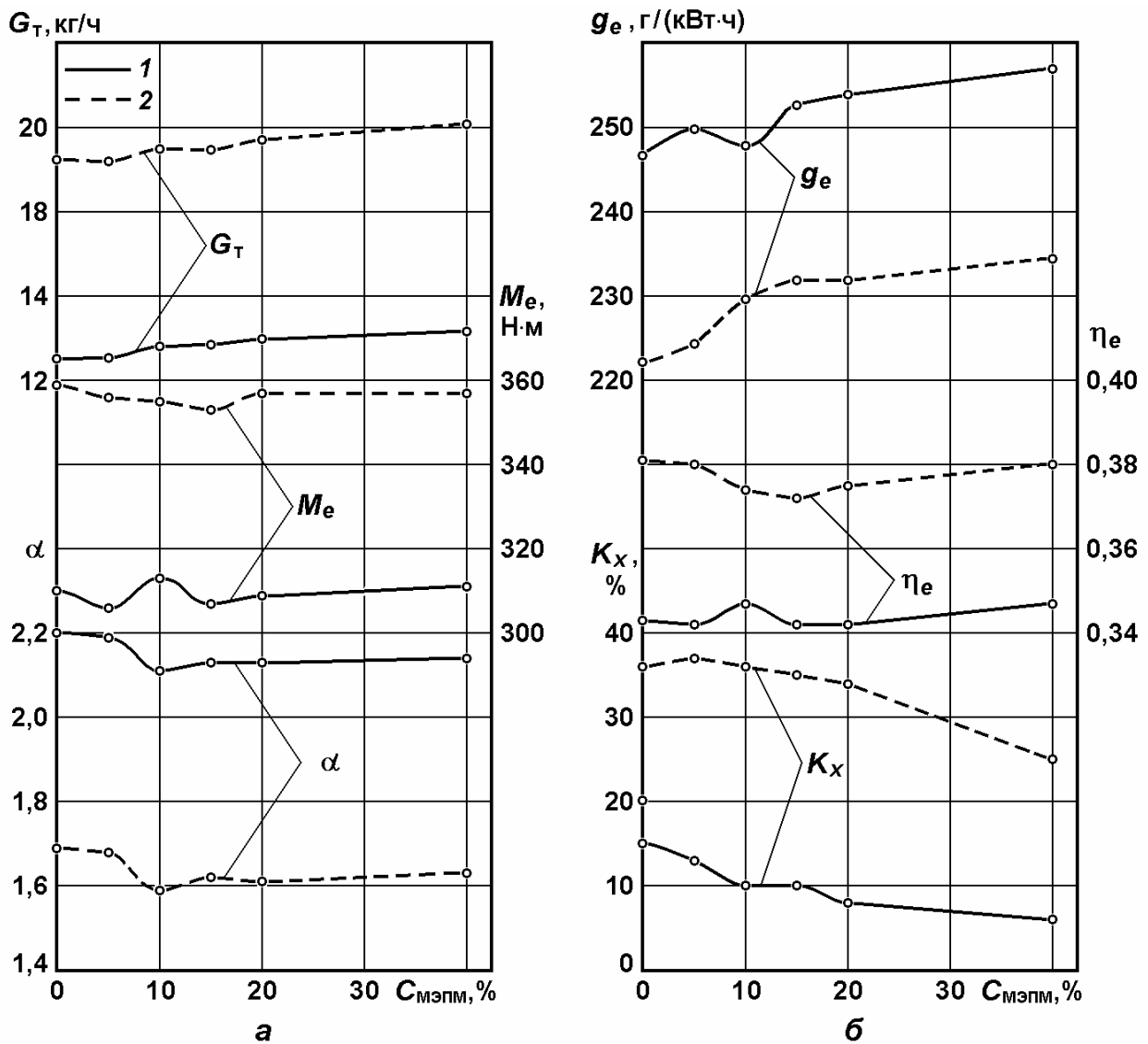


Рис. 5. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  дизеля Д-245.12С, крутящего момента  $M_e$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (а), удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД двигателя  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_x$  (б) от содержания метилового эфира подсолнечного масла  $C_{MЭПМ}$  в смешанном биотопливе: 1 – на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 – на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$

Характеристики дизеля Д-245.12С, приведенные на рис. 5,б и в табл. 4, показывают, что увеличение концентрации МЭПМ в смешанном биотопливе  $C_{MЭПМ}$  от 0 до 40% сопровождалось ростом удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ . На режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  эффективный расход топлива увеличился от 222,1 до 234,5 г/(кВт·ч), а на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  – от 246,6 до 257,0 г/(кВт·ч). Но при этом эффективный КПД дизеля  $\eta_e$  изменялся сравнительно слабо. Отмечена сильная зависимость дымности ОГ от состава смешанного биотоплива. При росте  $C_{MЭПМ}$  от 0 до 40% на режиме максимального крутящего мо-

мента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  дымность ОГ  $K_x$  снизилась от 36 до 25 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  – от 15 до 6% по шкале Хартриджа (в 2,5 раза).

Характеристики и значения удельных массовых выбросов токсичных компонентов  $e_{\text{NO}_x}$ ,  $e_{\text{CO}}$ ,  $e_{\text{CH}}$ , представленные на рис. 6 и в табл. 4, подтвердили возможность заметного улучшения показателей токсичности ОГ исследуемого дизеля при использовании смесей дизельного топлива и МЭПМ. При росте содержания МЭПМ в ДТ  $C_{\text{МЭПМ}}$  от 0 до 40% удельные массовые на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла выбросы оксидов азота  $\text{NO}_x$  снизились с 5,948 до 5,742 г/(кВт·ч), т.е. на 3,5%, монооксида углерода  $\text{CO}$  – с 2,782 до 1,949 г/(кВт·ч), т.е. на 29,9%, несгоревших углеводородов  $\text{CH}$  – от 1,006 до 0,784 г/(кВт·ч), т.е. на 22,1%. Одновременно отмечено незначительное снижение условного эффективного КПД двигателя  $\eta_{\text{е усл}}$  на 1,7% - от 0,351 при  $C_{\text{МЭПМ}}=0$  до 0,345 при  $C_{\text{МЭПМ}}=40\%$ .

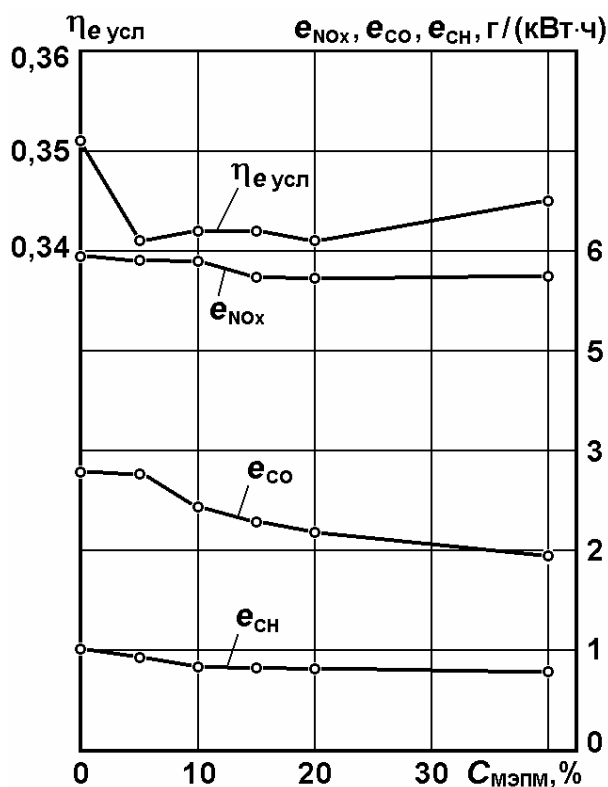


Рис. 6. Зависимость условного эффективного КПД двигателя  $\eta_{\text{е усл}}$  и удельных массовых выбросов с ОГ дизеля Д-245.12С оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$ , монооксида углерода  $e_{\text{CO}}$  и несгоревших углеводородов  $e_{\text{CH}}$  от содержания метилового эфира подсолнечного масла  $C_{\text{МЭПМ}}$  в смесевом биотопливе на режимах 13-ступенчатого цикла

В целом, проведенные исследования подтвердили возможность эффективного использования смесей дизельного топлива с МЭПМ в качестве топлива для отечественных дизелей. В исследуемом диапазоне изменения содержания МЭПМ в нефтяном ДТ наилучшее сочетание показателя топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля Д-245.12С достигнуто при его работе на смеси 60% ДТ и 40% МЭПМ (при  $C_{\text{МЭПМ}}=40\%$ ). При таком составе смесевое биотопливо достигнуты минимальные удельные массовые выбросы нормируемых токсичных компонентов ОГ (оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$ , монооксида

углерода  $e_{CO}$ , несгоревших углеводородов  $e_{CH}$ ) на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла, минимальная дымность ОГ  $K_x$  на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента, а эффективный КПД дизеля  $\eta_{e\text{ усл}}$  снизился лишь на 1,7% по сравнению с работой на нефтяном дизельном топливе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: Учебное пособие // В.А. Марков и др. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. 464 с.
2. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
3. Рапсовое масло в смеси с дизельным топливом / С.Н. Девянин и др. // Техника и оборудование для села. 2010. № 9. С. 45-46.
4. Метилловый эфир рапсового масла – новое топливо для отечественных автомобильных дизелей / В.А. Марков и др. // Автомобильная промышленность. 2008. № 4. С. 8-11.
5. Капралов Д.А., Троицкий А.А. Электростанция на пальмовом масле работает в Италии // Турбины и дизели. 2008. № 4. С. 2-7.
6. Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. М.: изд-во МГАУ им. В.П. Горячкина, 2008. 340 с.
7. Hamasaki K., Tajima H., Takasaki K. et al. Utilization of Waste Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel // SAE Technical Paper Series. 2001. № 2001-01-2021. P. 1-6.
8. Тюкавкина Н.А., Бауков Ю.И. Биоорганическая химия: Учебник для ВУЗов. М.: Медицина, 1991. 528 с.
9. Гриндберг И.И. Органическая химия: Учебник для ВУЗов. М.: Высшая школа, 1987. 480 с.
10. Zubik J., Sorenson S.C., Goering C.E. Diesel Engine Combustion of Sunflower Oil Fuels // Transactions of the ASAE. 1984. Vol. 27. № 5. P. 1252-1256.
11. Hawkins C.S., Fuls J., Hugo F.J.C. Sunflower Oil Esters: an Alternative Fuel for Direct Injection Diesel Engines // SAE Technical Paper Series. 1983. № 831356. P. 1-6.
12. Kaufman K.R., Ziejewski M. Laboratory Endurance Test of Sunflower Methyl Esters for Direct Injected Diesel Engine Fuel // ASAE Paper. 1983. № 83-3557. 6 p.
13. Kaufman K.R., Ziejewski M. Sunflower Methyl Esters for Direct Injected Diesel Engines // Transactions of the ASAE. 1984. Vol. 27. № 6. P. 1626-1633.

14. Ikilic C., Yucesu H. Investigation of the Effect of Sunflower Oil Methyl Ester on the Performance of a Diesel Engine // Energy Sources. 2006. Vol. 27. № 13. P. 1225-1234.

15. Марков В.А., Девянин С.Н., Маркова В.В. Использование подсолнечного масла в качестве топлива для дизелей // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 5. С. 42-47.

\*\*\*

**«Работа транспортного дизеля на смесях дизельного топлива  
и метилового эфира подсолнечного масла»**

**«Operation of Vehicle Diesel Engine on Mixtures of Diesel Fuel  
and Sunflower Oil Methyl Ester»**

Марков В.А. – доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Девянин С.Н. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина (МГАУ им. В.П. Горячкина).

Нагорнов С.А. – доктор технических наук, заместитель директора по науке Всероссийского научно-исследовательского института использования техники и нефтепродуктов Россельхозакадемии (ГНУ «ВНИИТиН», г. Тамбов), профессор Тамбовского государственного технического университета.

Markov V.A. – D. Sc. (Eng.), professor of «Heat Physics» department of the Bauman Moscow State Technical University.

Devyanin S.N. – D. Sc. (Eng.), professor, head of «Tractors and Automobiles» department of the Moscow State University for Agriculture and Engineering n.a. V.P. Goryachkin.

Nagornov S.F. – D. Sc. (Eng.), professor of the Tambov State Technical University, depute director on science of the All-Russia Research Institute for Using Machinery and Oil Products of Russian Academy of Agricultural Sciences (Tambov).

## АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С малотоннажного автомобиля ЗиЛ 5301 «Бычок», работающего на смесях дизельного топлива и метилового эфира подсолнечного масла. Подтверждена возможность значительного улучшения показателей токсичности отработавших газов исследуемого дизеля при его работе на смесевых биотопливах.

## ABSTRACT

Results of experimental research of a vehicle diesel engine of the type D-245.12S of the small tonnage car ZiL 5301 «Bychok» running on mixtures diesel fuel and sunflower oil methyl ester have been shown. The possibility of the substantial improvement of toxicity factors of exhaust gases of the investigated diesel engine is confirmed in its operation on mixed biofuels.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дизельный двигатель, дизельное топливо, метиловый эфир подсолнечного масла, смесевое биотопливо, токсичность отработавших газов

**KEY WORDS:** diesel engine, diesel fuel, sunflower oil methyl ester, mixed biofuel, exhaust gas toxicity