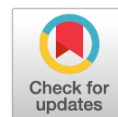


ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА ПО ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ДИЗЕЛЯ



DETERMINATION OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF MIXED FUEL BASED ON THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF A DIESEL ENGINE

С.А. ПЛОТНИКОВ, д.т.н.
Ш.В. БУЗИКОВ, к.т.н.
И.С. КОЗЛОВ

Вятский государственный университет, Киров, Россия,
shamilvb@mail.ru

S.A. PLOTNIKOV, Dsc in Engineering
SH.V. BUZIKOV, PhD in Engineering
I.S. KOZLOV

Vyatka State University, Kirov, Russia, shamilvb@mail.ru

Применение в тракторных двигателях и другой сельскохозяйственной технике рапсового масла (РМ) в чистом виде или смеси РМ с дизельным топливом (ДТ) накладывает ряд ограничений, связанных с некоторым различием физико-химических свойств. Поэтому наиболее перспективным является использование смесового топлива (СТ) состоящего из ДТ и РМ. Целью настоящих исследований является определение оптимального состава СТ, состоящего из ДТ и РМ, путем оптимизации аппроксимированных зависимостей экологических показателей дизеля. Для решения поставленной задачи проведены стендовые испытания работы дизеля Д-245.5С, размерностью 4ЧН 11,0/12,5. В качестве определяемых экологических показателей работы дизеля выбраны: сажа (С), оксиды азота (NO_x), несгоревшие углеводороды (C_xH_y), диоксид углерода (CO_2) и монооксид углерода (СО). Исследования проведены на различных составах СТ состоящих из 80 % ДТ и 20 % РМ, 55 % ДТ и 45 % РМ, 20 % ДТ и 80 % РМ по массе соответственно. В результате проведенных стендовых испытаний получены две нагрузочные характеристики, одна из которых – при частоте вращения $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей значению максимального крутящего момента, а вторая – при частоте вращения $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей значению номинальной мощности, а также внешняя скоростная характеристика тракторного дизеля Д-245.5С, размерностью 4ЧН 11,0/12,5. Анализ полученных экспериментальных данных выявил зависимости экологических показателей от частоты вращения коленчатого вала дизеля, среднего эффективного давления и добавки РМ в СТ по массе. При помощи метода наименьших квадратов определены аппроксимированные математические зависимости экологических показателей дизеля. Анализ полученных зависимостей показал, что: увеличение частоты вращения коленчатого вала n , доли РМ в СТ и снижение среднего эффективного давления p_e приводит к снижению сажи С до 4,0 %, оксидов азота NO_x до 100,0 ppm, несгоревших углеводородов C_xH_y до 1,0 ppm, диоксида углерода CO_2 до 2 % и увеличению монооксида углерода СО до 0,16 %. В результате решения полученной системы уравнений аппроксимированных зависимостей экологических показателей определили оптимальную добавку РМ в СТ до 35 % по массе.

Ключевые слова: смесовое топливо, экологические показатели, характеристики дизеля, аппроксимация экспериментальных данных.

Для цитирования: Плотников С.А., Бузиков Ш.В., Козлов И.С. Определение оптимального состава смесового топлива по экологическим показателям дизеля // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 1. С. 14–22. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-1-14-22.

The use of rapeseed oil (RO) in tractor engines and other agricultural machinery in its pure form or a mixture of RO with diesel fuel (DF) imposes a number of limitations associated with some difference in physical and chemical properties. Therefore, the most promising is the use of mixed fuel (MF) consisting of DF and RO. The purpose of these studies is to determine the optimal composition of the MF, consisting of DF and RM by optimizing the approximated dependences of the environmental indicators of a diesel engine. To solve this problem, bench tests of the operation of the D-245.5S diesel engine (4ChN 11,0/12,5) were carried out. The following determined environmental performance indicators of a diesel engine are selected: soot (C), nitrogen oxides (NO_x), unburned hydrocarbons (C_xH_y), carbon dioxide (CO_2) and carbon monoxide (CO). The studies were carried out on various compositions of MF, consisting of 80 % DF and 20 % RO, 55 % DF and 45 % RO, 20 % DF and 80 % RO by weight, respectively. As a result of the bench tests, two load characteristics were obtained, the one at a speed of $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ corresponding to the value of the maximum torque, and the second at a speed of $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ corresponding to the value of the rated power, as well as the external speed characteristic of the D-245.5S tractor diesel engine (4ChN 11,0/12,5). The analysis of the obtained experimental data revealed the dependence of environmental indicators on the rotational speed of the diesel engine crankshaft, the average effective pressure and the addition of RO in MF by weight. Using the least squares method, the approximated mathematical dependences of the ecological indicators of a diesel engine are determined. The analysis of the obtained dependencies showed that: the increase in the crankshaft speed n , the proportion of RO in MF and a decrease in the average effective pressure p_e , leads to a decrease in soot C to 4,0 %, nitrogen oxides NO_x to 100,0 ppm, unburned hydrocarbons C_xH_y to 1,0 ppm, carbon dioxide CO_2 up to 2 % and an increase

in carbon monoxide CO up to 0,16 %. As a result of solving the obtained system of equations for the approximated dependences of environmental indicators, the optimal addition of RO to MF of up to 35 % by weight was determined.

Keywords: mixed fuel, environmental performance, diesel characteristics, approximation of experimental data.

Cite as: Plotnikov S.A., Buzikov S.H.V., Kozlov I.S. Determination of the optimal composition of mixed fuel based on the environmental performance of a diesel engine. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021. No 1, pp. 14–22 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-1-14-22.

Введение

Инновационное сельскохозяйственное производство на сегодняшний день диктует определенные требования связанные, прежде всего, с повышением как эксплуатационных, так и экологических характеристик к используемой техники. Наряду с модернизацией конструктивно-технологических схем применяемых машин, а также истощением традиционных энергоресурсов и соответствием ужесточающимся экологическим требованиям актуальными направлениями являются разработка и исследование эффективности применения новых альтернативных моторных топлив, в том числе смесевых топлив (СТ) [1]. К ним относятся масла растительного происхождения [1].

Применение в тракторных двигателях и другой сельскохозяйственной технике рапсового масла (РМ) в чистом виде или смеси РМ с дизельным топливом (ДТ) накладывает ряд ограничений, связанных с некоторым различием физико-химических свойств [1]. В связи с чем образование токсичных веществ в отработавших газах дизеля будет отличаться. Применение чистого РМ в качестве моторного топлива для дизелей затруднено, так как требует разработки для этого специальных систем питания [2]. Поэтому наиболее перспективным является использование СТ, состоящего из ДТ и РМ. Определение необходимого оптимального количества РМ в СТ с точки зрения экологии является на сегодняшний день актуальной задачей. В работах [3–9] проведены исследования для дизеля Д-245.12С по оптимизации состава СТ, состоящего из ДТ и РМ. Предложена методика оптимизации состава этих смесей, базирующаяся на определении обобщенного критерия оптимальности, вычисляемого в виде суммы частных критериев, которые характеризуют концентрацию в отработавших газах оксидов азота и сажи, а также суммарного условного коэффициента агрессивности отработавших газов, определяемого в виде суммы относительных удельных вы-

бросов нормируемых токсичных компонентов и дымности на режиме максимального крутящего момента [3–9]. Для СТ с содержанием РМ 60 % получены минимальные значения обобщенного критерия оптимальности и условного коэффициента агрессивности [3–9]. Однако определение оптимальной добавки РМ в СТ при работе дизеля на других нагрузочных и скоростных режимах работы представляет научный интерес.

Одним из наиболее эффективных, точных и проверенных методов обработки экспериментальных данных является аппроксимация, при помощи которой с достаточной долей вероятности можно определить, как интерполируя, так и экстраполируя, оптимальные значения контролируемых параметров при заданных условиях оптимизации [10–12].

Цель исследований

Определение оптимального состава СТ, состоящего из ДТ и РМ, путем оптимизации аппроксимированных зависимостей экологических показателей дизеля.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи проведены стендовые испытания работы дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5. В качестве определяемых экологических показателей работы дизеля выбраны: сажа (С), оксиды азота (NO_x), несгоревшие углеводороды (C_xH_y), диоксид углерода (CO_2) и монооксид углерода (СО).

Установка для проведения стендовых испытаний состояла из нагрузочного стенда RAPIDO, балансирующей маятниковой машины SAK N670 и установленного на нем дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5, а также приборов для определения дымности и токсичности отработавших газов, массового расхода воздуха и топлива, давления и температуры масла, охлаждающей жидкости, отработавших газов и весового устройства. На момент проведения испытаний все приборы прошли государственную поверку.

Исследования проведены на различных составах смесового топлива. На первом этапе на чистом ДТ, далее – при различном массовом содержании РМ в смесовом топливе. Исследуемые составы включали из 80 % ДТ и 20 % РМ, 55 % ДТ и 45 % РМ, 20 % ДТ и 80 % РМ по массе, соответственно. Методика проведения стендовых испытаний соответствовала ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний (с Изменением № 1)». Необходимый состав СТ получали путем предварительного смешивания массовых долей составляющих компонентов ДТ и РМ. После этого осуществляли заправку этим составом топливного бака дизеля.

В связи с тем что чистое РМ, а также его смеси с ДТ имели меньшую удельную низшую расчетную теплоту сгорания по сравнению с чистым ДТ, для обеспечения паспортных значений эффективной мощности и максимального крутящего момента было необходимым увеличить цикловую подачу на величину разницы значения низшей расчетной удельной теплоты сгорания между СТ и чистым ДТ. Поэтому при проведении испытаний на различных составах СТ каждый раз производилась регулировка топливного насоса высокого давления (ТНВД) путем изменения активного хода плунжера с целью увеличения его цикловой подачи.

Перед проведением исследований были получены регулировочные характеристики дизеля на вышеуказанных составах СТ, в результате которых определены значения установочного угла опережения впрыскивания топлива равного 26° .

Результаты и обсуждение

В результате проведенных стендовых испытаний получены две нагрузочные характеристики, одна из которых – при частоте вращения $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ соответствующей значению максимального крутящего момента, а вторая при частоте вращения $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей значению номинальной мощности, а также внешняя скоростная характеристика тракторного дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ с различной добавкой РМ.

На рис. 1 представлены графики зависимости экологических показателей работы дизеля при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и различной добавке РМ в СТ от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала.

Анализ экологических показателей, представленных на рис. 1, а показал, что при увеличении нагрузки с 0,2 до 1,2 МПа и содержании РМ в СТ до 55 % снизились концентрации в отработавших газах: сажи С – с 17,10 до 6,9 %, оксидов азота NO_x – с 2490 до 307 ppm, несгоревших углеводородов C_xH_y – с 14,0 до 1,0 ppm и диоксида углерода CO_2 – с 10,97 до 2,70 %, а концентрация монооксида углерода СО увеличилась с 0,01 до 0,05 %, соответственно.

На рис. 1, б видно, что при увеличении нагрузки с 0,2 до 1,0 МПа и содержании РМ в СТ до 55 % снизились концентрации в отработавших газах: сажи С – с 38,03 до 6,8%, оксидов азота NO_x – с 2630 до 131 ppm, несгоревших углеводородов C_xH_y – с 13,0 до 1,0 ppm и диоксида углерода CO_2 – с 8,77 до 2,09 %, а концентрация монооксида углерода СО увеличилась с 0,01 до 0,09 %, соответственно.

Проведенный анализ зависимостей (рис. 1, в) выявил, что при снижении n с 1400 до 2000 мин^{-1} и увеличении доли РМ в СТ до 55 % снизились концентрации в отработавших газах: сажи С – с 48,57 до 8,70 %, несгоревших углеводородов C_xH_y – с 17,0 до 4,0 ppm и оксидов азота NO_x – с 2730 до 1510 ppm. А при увеличении n с 1400 до 2000 мин^{-1} и увеличении доли РМ в СТ до 55 % концентрация в отработавших газах монооксида углерода СО увеличилась с 0,03 до 0,15 %, а диоксида углерода CO_2 снизилась с 10,97 до 6,80 %, соответственно.

Для определения оптимального состава СТ, используемого в качестве топлива для исследуемого дизеля, провели аппроксимацию зависимостей экологических показателей от n , среднего эффективного давления p_e и содержания РМ в СТ – %.

Анализ имеющихся методов аппроксимации экспериментальных данных, показал, что применение метода аппроксимации функцией для нахождения дополнительных значений, отличных от экспериментальных данных, при которой функция проходит не через узлы интерполяции, а между ними, является вполне достоверным, а получаемая математическая зависимость позволяет проводить многопараметрическую оптимизацию [13].

Наиболее рациональным с точки зрения получения очень точных значений функций в случае достаточно достоверных экспериментальных данных является применение метода наименьших квадратов (МНК) [14]. Данный ма-

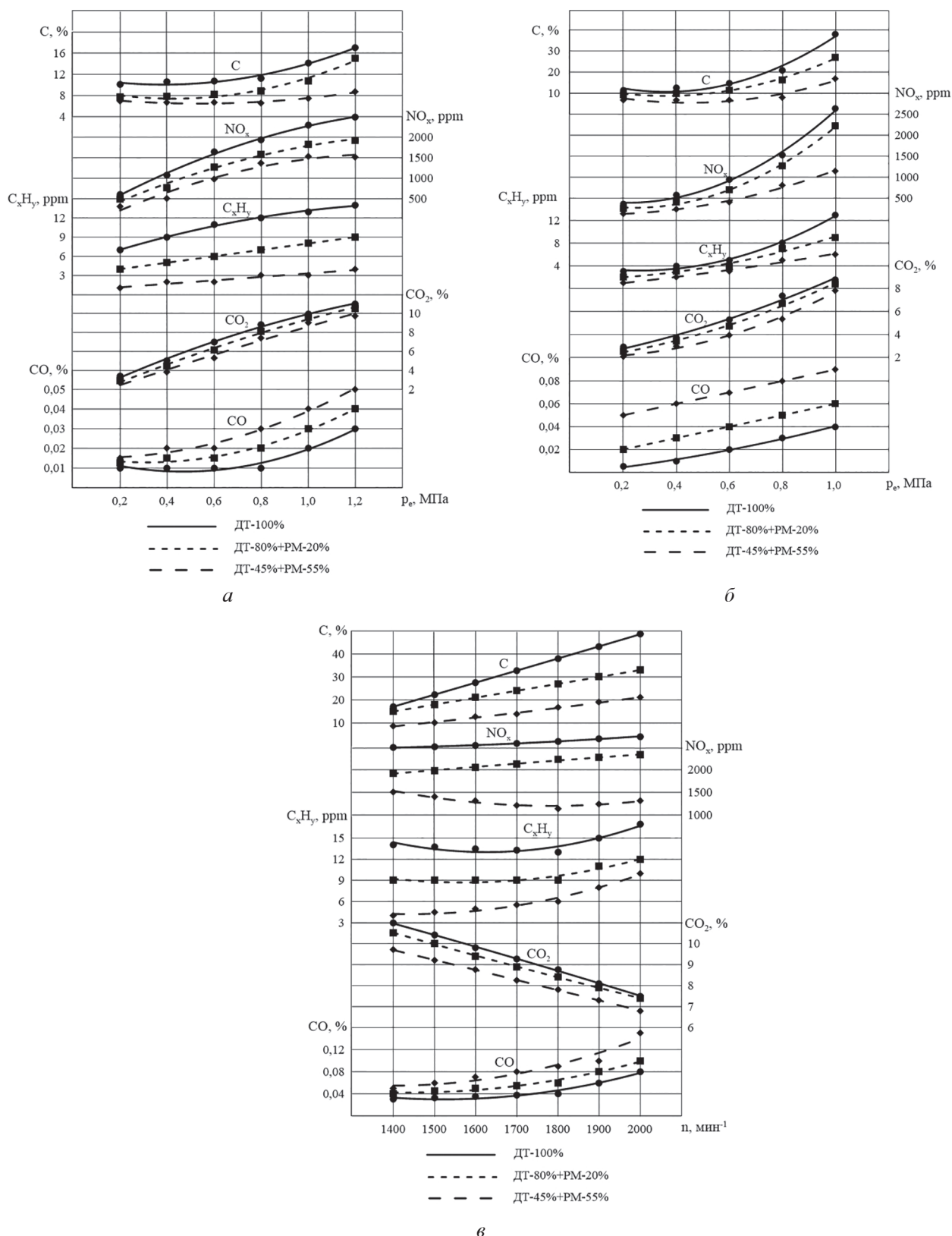


Рис. 1. Характеристики дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ с различной добавкой РМ:

a – нагрузочная при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$; *б* – нагрузочная при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; *в* – внешняя скоростная

Fig. 1. Characteristics of the D-245.5S diesel engine (4ChN 11,0/12,5) when operating on MF with various RO additives: *a* – load performance at $n = 1400 \text{ min}^{-1}$; *б* – load performance at $n = 1800 \text{ min}^{-1}$; *в* – full-load curve

тематический метод основан на минимизации суммы квадратов отклонений функций от искоемых переменных; используется для решения переопределенных систем уравнений (когда количество уравнений превышает количество неизвестных) и обычных (не переопределенных) нелинейных систем уравнений, а также для аппроксимации точечных значений некоторой функции по выборочным данным [15].

Отклонения аппроксимированных функций полученных экологических показателей дизеля в зависимости от выбранных факторов:

$$e_i = y_i - f_i(n, p_e, PM), \quad (1)$$

где e_i – значение отклонения экспериментальных данных в % или ppm от значений, рассчитанных по аппроксимированной функции; y_i – экспериментальные значения экологических показателей дизеля, $C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO$ [%], соответственно; $f_i(n, p_e, PM)$ – значения экологических показателей дизеля, $C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO$ [%], соответственно, аппроксимированной функции.

Задача состояла в нахождении таких значений n, p_e, PM , при которых сумма квадратов отклонений выражения (1) будет стремиться к минимуму:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f_i(n, p_e, PM\%))^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Полученные экспериментальные значения экологических показателей дизеля представляют собой трехмерные массивы данных, а значения элементов массива – значения экологических показателей. Затем нашли функцию, которая является оптимальной с точки зрения МНК – это уравнения второго порядка, имеющие вид:

$$(C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO) = b \cdot p_e^2 + c \cdot PM^2 + d \cdot n \cdot p_e + f \cdot n \cdot PM + g \cdot p_e \cdot PM + h \cdot n + i \cdot p_e + j \cdot PM + k, \quad (3)$$

где $a, b, c, d, f, g, h, i, j$ – искоемые коэффициенты.

Теперь с учетом выражения (3) получили функции, представляющие собой суммы квадратов отклонений известных экспериментальных данных от соответствующих данных, полученных на аппроксимированных зависимостях.

Подставив выражение (3) в выражение (2), получили:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(y_i - (C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO) \right)^2. \quad (4)$$

Далее для определения искоемых коэффициентов в выражении (3) на основе обращения в нуль в точке минимума функций $C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO$ ее производных определили систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(b)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot p_e^2 = 0 \\ \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(c)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot PM^2 = 0 \\ \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(d)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot n \cdot p_e = 0 \\ \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(f)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot n \cdot PM = 0 \\ \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(g)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot p_e \cdot PM = 0 \\ \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(h)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot n = 0 \\ \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(i)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot p_e = 0 \\ \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(j)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot PM = 0 \\ \frac{C, NO_x, C_xH_y, CO_2, CO}{d(k)} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \cdot 1 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

После раскрытия скобок в системе уравнений (5) и приравнивания к нулю получили «громоздкую» систему уравнений. Далее для ее решения воспользовались алгоритмом Гаусса – Ньютона:

– сначала обнулили многочлены при искоемых коэффициентах a , начиная со второго уравнения, для этого определили коэффициенты для первого уравнения;

– умноженное на соответствующий коэффициент первое уравнение прибавили к ниже лежащему, в результате многочлены при искоемых коэффициентах a сократились;

– продолжая преобразование, нашли коэффициенты для второго уравнения в новой системе – такие, что многочлены при искоемых коэффициентах b сократились из уравнений с третьего и ниже и т.д.

В результате преобразований по алгоритму Гаусса – Ньютона получили искомые коэффициенты в уравнении (3) для всех критериев C , NO_x , C_xH_y , CO_2 , CO :

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 25,8 \cdot p_e^2 + 0,0002 \cdot PM^2 + 0,05 \cdot n \cdot p_e + \\ + 0,0003 \cdot n \cdot PM + 0,3 \cdot p_e \cdot PM + 0,005 \cdot n + \\ + 89,9 \cdot p_e + 0,5 \cdot PM + 18,8 \\ NO_x = 987 \cdot p_e^2 - 0,06 \cdot PM^2 + 1,05 \cdot n \cdot p_e - \\ - 0,008 \cdot n \cdot PM - 19,6 \cdot p_e \cdot PM - 1,01 \cdot n - \\ - 344,8 \cdot p_e + 15,9 \cdot PM + 1769,2 \\ C_xH_y = 4,16 \cdot p_e^2 + 0,0002 \cdot PM^2 + 0,01 \cdot n \times \\ \times p_e + 0,0002 \cdot n \cdot PM - 0,1 \cdot p_e \cdot PM - \\ - 0,01 \cdot n - 11,8 \cdot p_e - 0,4 \cdot PM + 27,1 \\ CO_2 = 2,7 \cdot p_e^2 - 0,00003 \cdot PM^2 - \\ - 0,002 \cdot n \cdot p_e + 0,000002 \cdot n \cdot PM - \\ - 0,004 \cdot p_e \cdot PM - 0,001 \cdot n + 8,1 \cdot p_e - \\ - 0,01 \cdot PM + 4,5 \\ CO = 0,02 \cdot p_e^2 + 0,000004 \cdot PM^2 + \\ + 0,00006 \cdot n \cdot p_e + 0,000001 \cdot n \cdot PM + \\ + 0,0002 \cdot p_e \cdot PM - 0,00001 \cdot n - 0,1 \cdot p_e - \\ - 0,002 \cdot PM + 0,03. \end{array} \right. \quad (6)$$

Полученная система уравнений (6) представляет собой математические зависимости экологических показателей дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5 от p_e , доли РМ по массе в СТ и n .

Достоверность аппроксимации полученной системы уравнений экологических показателей (6), рассчитанных методом наименьших квадратов составила 97,24 %, коэффициент Дарбина – Уотсона составил 1,85, средняя абсолютная ошибка 1,71, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости полученных экспериментальных данных с рассчитанными математическими моделями. Графическая интерпретация полученных зависимостей экологических показателей, рассчитанных по уравнениям (6), представлена на рис. 2.

Анализ полученных зависимостей, представленных на рис. 2 показал что увеличение n , доли РМ в СТ и снижение p_e приводит к снижению сажи C до 4,0 %, оксидов азота NO_x до 100,0 ppm, несгоревших углеводородов C_xH_y до 1,0 ppm, диоксида углерода, CO_2 до 2 % и увеличению монооксида углерода CO до 0,16 %.

Для нахождения оптимального состава СТ, включающего ДТ и РМ, решили систему уравнений, в которой основным условием было найти значения n , РМ и p_e при минимально возможных значениях всех экологических показателей:

$$\left\{ \begin{array}{l} C(p_e, PM, n) = \min \\ NO_x(p_e, PM, n) = \min \\ C_xH_y(p_e, PM, n) = \min \\ CO_2(p_e, PM, n) = \min \\ CO(p_e, PM, n) = \min. \end{array} \right. \quad (7)$$

После совместного решения системы уравнений (6) при условии (7) получены оптимальные значения факторов n , РМ и p_e , при которых достигаются минимальные значения экологических показателей дизеля.

Так как нахождение взаимных минимумов системы уравнений предполагает наличие интервала из-за множества решений, то определили наиболее вероятное оптимальное решение исходя из критерия оптимальности (k -optimum), при котором наиболее вероятное значение будет равным более 0,96.

Результат оптимального решения системы уравнений (6) с условием (7) представлен на рис. 3.

Анализ зависимости, представленной на рис. 3, показывает, что оптимальным составом СТ является добавка в него доли РМ до 35 % по массе, при которой обеспечиваются минимальные экологические показатели дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5.

Выводы

1. В результате проведенных экспериментальных исследований получены зависимости экологических показателей работы дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при частоте вращения коленчатого вала, соответствующей значению максимального крутящего момента $n = 1400$ мин⁻¹, частоте вращения коленчатого вала, соответствующей значению номинальной мощности $n = 1800$ мин⁻¹, различной нагрузке и добавке РМ в СТ.

2. Анализ полученных экспериментальных данных выявил зависимости экологических показателей от частоты вращения коленчатого вала дизеля, среднего эффективного давления и добавки РМ в СТ по массе.

3. При помощи метода наименьших квадратов определены аппроксимированные ма-

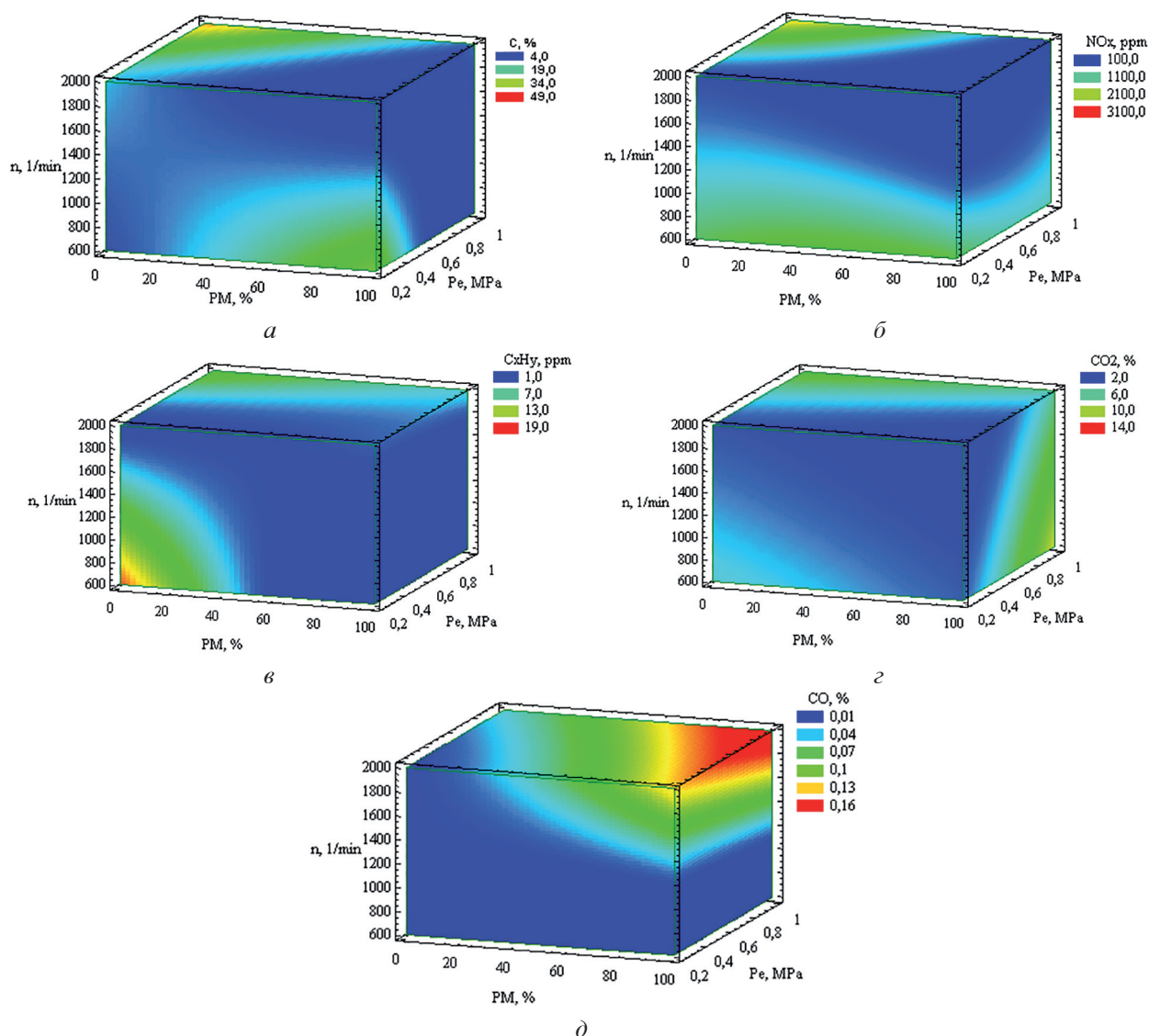


Рис. 2. Зависимости:

а – сажи C, %; б – оксидов азота NO_x , ppm; в – несгоревших углеводородов C_xH_y , ppm; г – диоксида углерода CO_2 , %; д – монооксида углерода CO, % от среднего эффективного давления p_e , МПа, доли РМ по массе в СТ, %, и частоты вращения коленчатого вала n , мин⁻¹, дизеля Д-245.5С, размерностью 4ЧН 11,0/12,5

Fig. 2. Dependences of: а – soot C, %; б – nitrogen oxides NO_x , ppm; в – unburned hydrocarbons C_xH_y , ppm; д – carbon dioxide CO_2 , %; е – carbon monoxide CO, % on the average effective pressure p_e , MPa, the share of RO by mass in MF, % and the crankshaft rotation speed n , min⁻¹ of D-245.5S diesel engine (4ChN 11,0/12,5)

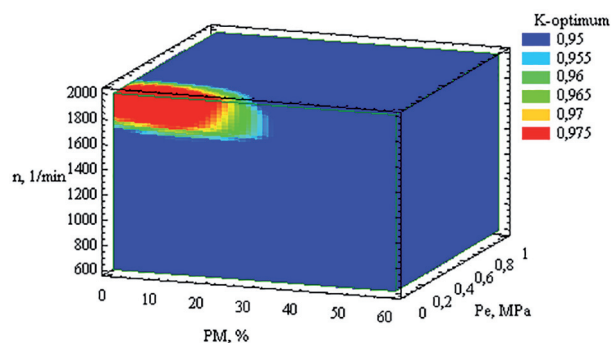


Рис. 3. Зависимость критерия оптимальности (k-оптimum) от среднего эффективного давления p_e , МПа, доли РМ по массе в СТ, %, и частоты вращения коленчатого вала n , мин⁻¹, дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5

Fig. 3. Dependence of the optimality criterion (k-optimum) on the average effective pressure p_e , MPa, the share of RO by mass in MF, % and the crankshaft rotation speed n , min⁻¹ of D-245.5S diesel engine (4ChN 11,0/12,5)

тематические зависимости экологических показателей дизеля, показавшие что увеличение частоты вращения коленчатого вала n , доли РМ в СТ и снижение среднего эффективного давления p_e приводит к снижению сажи С до 4,0 %, оксидов азота NO_x до 100,0 ppm, несгоревших углеводородов C_xH_y до 1,0 ppm, диоксида углерода CO_2 до 2 % и увеличению монооксида углерода CO до 0,16 %.

4. В результате решения полученной системы уравнений аппроксимированных зависимостей экологических показателей определили оптимальную добавку РМ в СТ до 35 % по массе.

Литература

1. Плотников С.А. и др. Исследование работы автотракторного дизеля 4ЧН 11,0/12, 5 на смесях дизельного топлива с рапсовым маслом // Молочнохозяйственный вестник. 2017. № 1 (25).
2. Матиевский Д.Д. и др. Применение топлива на основе рапсового масла в дизелях // Ползуновский вестник. 2006. № 4. С. 118.
3. Марков В.А., Девянин С.Н., Каськов С.И. Оптимизация состава смесей нефтяного дизельного топлива с растительными маслами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 7 (676). С. 28–44.
4. Марков В.А., Маркова В.В., Сивачев В.М., Сивачев С.М. Оптимизация состава смесового биотоплива для дизельных двигателей // Безопасность в техносфере. 2014. № 6. С. 19–30.
5. Марков В.А. и др. Оптимизация состава многокомпонентных биотоплив для дизелей сельскохозяйственных машин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 12. С. 51–63.
6. Марков В.А. и др. Оптимизация состава смесовых биотоплив на основе растительных масел для дизельных двигателей // NBI-technologies. 2014. № 4.
7. Иващенко Н.А. и др. Оптимизация состава смесового биотоплива на основе частотного масла для транспортного дизеля // Materials of the reports on the Intern. Conf., dedicated to the 100th anniversary of the engine-building school of the Bauman's MSTU. Moscow. 2007. С. 366–371.
8. Адгамов И.Ф., Шаталов К.В., Костылева О.В. Оптимизация состава дизельного смесового топлива // Эксплуатация автотракторной и сельскохозяйственной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы. 2017. С. 6–9.
9. Марков В.А., Девянин С.Н., Быковская Л.И. Оптимизация состава многокомпонентных смесовых

биотоплив для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 12.

10. Reza Miri S Mousavi Seyedi S Ghobadian B Effects of biodiesel fuel synthesized from non-edible rapeseed oil on performance and emission variables of diesel engines. Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 142.
11. Hellier P., Ladommatos N., Yusaf T. The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions. Fuel. 2015. Vol. 143.
12. Szabados G., Bereczky B. Experimental investigation of physicochemical properties of diesel, biodiesel and TBK-biodiesel fuels and combustion and emission analysis in CI internal combustion engine. Renewable Energy. 2018. Vol. 121.
13. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Решение задачи аппроксимации криволинейных поверхностей слоями с постоянным и переменным сечением при формообразовании аддитивными методами // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 3 (76).
14. Chuban M., Sheychenko R., Graborov R. Модели аппроксимации поверхности отклика в оптимизационных исследованиях машиностроительных конструкций // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2015. № 62. С. 46–51.
15. Голубинский А.Н. Методы аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей // Вестник Воронежского института МВД России. 2007. № 2.

References

1. Plotnikov S.A. i dr. Study of the operation of an auto-tractor diesel engine 4CHN 11, 0/12, 5 on mixtures of diesel fuel with rapeseed oil. Molochnokhozyaystvennyy vestnik. 2017. No 1 (25) (In Russ.).
2. Matiyevskiy D.D. i dr. The use of rapeseed oil-based fuels in diesel engines. Polzunovskiy vestnik. 2006. No 4, pp. 118 (In Russ.).
3. Markov V.A., Devyanin S.N., Kas'kov S.I. Optimization of the composition of mixtures of petroleum diesel fuel with vegetable oils. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. 2016. No 7 (676), pp. 28–44 (In Russ.).
4. Markov V.A., Markova V.V., Sivachev V.M., Sivachev S.M. Optimization of the composition of blended biofuels for diesel engines. Bezopasnost' v tekhnosfere. 2014. No 6, pp. 19–30 (In Russ.).
5. Markov V.A. i dr. Optimization of the composition of multicomponent biofuels for diesel engines

- of agricultural vehicles. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2013. No 12, pp. 51–63 (In Russ.).
6. Markov V.A. i dr. Optimization of the composition of blended biofuels based on vegetable oils for diesel engines. *NBI-technologies*. 2014. No 4 (In Russ.).
 7. Ivashchenko N.A. i dr. Optimization of mixed biofuel composition based on oil for transport diesel. Materials of the reports on the Intern. Conf., dedicated to the 100th anniversary of the engine-building school of the Bauman's MSTU. Moscow. 2007, pp. 366–371 (In Russ.).
 8. Adgamov I.F., Shatalov K.V., Kostyleva O.V. Optimization of the diesel mixed fuel composition. *Ekspluatatsiya avtotraktorov i sel'skokhozyaystvennoy tekhniki: opyt, problemy, innovatsii, perspektivy*. 2017, pp. 6–9 (In Russ.).
 9. Markov V.A., Devyanin S.N., Bykovskaya L.I. Optimization of the composition of multicomponent blended biofuels for diesel engines of agricultural machinery. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2013. No 12 (In Russ.).
 10. Reza Miri S., Mousavi Seyedi S., Ghobadian B. Effects of biodiesel fuel synthesized from non-edible rapeseed oil on performance and emission variables of diesel engines. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142.
 11. Hellier P., Ladommatos N., Yusaf T. The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions. *Fuel*. 2015. Vol. 143.
 12. Szabados G., Bereczky B. Experimental investigation of physicochemical properties of diesel, biodiesel and TBK-biodiesel fuels and combustion and emission analysis in CI internal combustion engine. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 121.
 13. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Solving the problem of approximating curvilinear surfaces by layers with constant and variable sections when forming using additive methods. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. No 3 (76) (In Russ.).
 14. Chuban M., Sheychenko R., Graborov R. Response surface approximation models in optimization studies of mechanical engineering structures. *Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu «KHPI»*. Seriya: Novi rishennya u suchasnikh tekhnologiyakh. 2015. No 62, pp. 46–51 (In Russ.).
 15. Golubinskiy A.N. Methods for approximating experimental data and building models. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*. 2007. No 2 (In Russ.).