

УДК 621.436

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106567>

Оригинальное исследование



Оптимизация основных параметров дизеля при его работе на многокомпонентной биотопливной композиции

С.А. Плотников¹, А.Н. Карташевич², М.В. Симонов¹, А.И. Шипин¹¹ Вятский государственный университет, Киров, Россия² Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. При проведении экспериментальных исследований, направленных на поиск оптимальных параметров режима работы дизеля, как и других объектов, остро встает вопрос сокращения объема эксперимента. Существенно сократить количество проводимых опытов без значительного снижения достоверности полученных данных позволяет применение современных методов планирования, получения, обработки и анализа экспериментальных данных.

Цель исследования. Определение оптимальных режимных характеристик работы дизеля на многокомпонентной биотопливной композиции.

Методы. Для определения оптимальных значений основных параметров, влияющих на эксплуатационные показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при его работе на многокомпонентной биотопливной композиции, и математического описания их взаимосвязи реализован план Бокса – Бенкена второго порядка для трех факторов: эффективная нагрузка, частота вращения коленчатого вала и угол опережения впрыскивания топлива. Исследования работы дизеля выполнены на наиболее стабильном составе многокомпонентной биотопливной композиции, включающей следующие ингредиенты, %, масс: рапсовое масло – 34,5; этанол – 31,0; дизельное топливо – 34,5. Методом наложения двумерных сечений поверхностей отклика эффективного КПД и удельного эффективного расхода топлива осуществлен поиск компромиссного решения по оптимальному сочетанию уровней изучаемых факторов.

Результаты. Получены адекватные модели регрессионного анализа второго порядка изменения эффективного КПД и удельного эффективного расхода топлива. Описано факторное пространство и проведены графоаналитические исследования. Анализ регрессионных моделей и двумерных сечений поверхностей отклика позволил определить оптимальные значения исследуемых факторов. Оптимизирована методика определения оптимальных нагрузочных и скоростных диапазонов работы дизеля на биотопливной композиции многокомпонентного состава за счет применения плана эксперимента и описания факторного пространства математическими моделями при сокращении количества опытов.

Выводы. Оптимальная область сочетания факторов находится в диапазоне варьирования частоты вращения коленчатого вала дизеля $n=1400...1550$ мин⁻¹ и эффективной нагрузки $P_e=0,68...0,85$ МПа при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.}=23,5$ градуса до верхней мертвой точки (ВМТ). Учитывая переменный характер нагрузочных и скоростных режимов дизеля в условиях реальной эксплуатации, полученные данные представляют практический интерес.

Ключевые слова: дизельное топливо; этанол; рапсовое масло; топливная композиция; стендовые испытания; эффективные показатели; планирование эксперимента.

Для цитирования:

Плотников С.А., Карташевич А.Н., Симонов М.В., Шипин А.И. Оптимизация основных параметров дизеля при его работе на многокомпонентной биотопливной композиции // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 2. С. 91–99. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106567>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106567>

Original study article

Optimization of the main parameters of the diesel engine during its operation on the multicomponent biofuel composition

Sergey A. Plotnikov¹, Anatoly N. Kartashevich², Maksim V. Simonov¹, Alexandr I. Shipin¹¹ Vyatka State University, Kirov, Russia² Belarusian State Agricultural Academy, Gorki, Belarus

ABSTRACT

BACKGROUND: When conducting experimental studies aimed at finding optimal parameters of the diesel engine operating mode, as well as other objects, the issue of reducing the volume of the experiment becomes acute. The use of modern methods of planning, obtaining, processing and analyzing experimental data allows to reduce significantly the number of experiments conducted without notable loss of the reliability of the data obtained.

AIMS: The aim of this study is to determine the optimal operating characteristics of the diesel engine, which uses the multicomponent bio-fuel composition.

METHODS: In order to determine the optimal values of the main parameters, affecting the effective indicators of the 4ChN 11.0/12.5 diesel engine when operating on the multicomponent biofuel composition and a mathematical description of their relationship, a second-order three-factor Box – Benken plan was implemented. These factors are effective load, crankshaft rotational speed, and fuel injection advance angle. The diesel engine operation studies were performed on the most stable mixture of the multicomponent biofuel composition, including the following ingredients, wt %: rapeseed oil – 34.5; ethanol – 31.0; diesel fuel – 34.5. The search of a compromise solution for the optimal combination of the levels of studied factors was performed with the method of superimposing of bidimensional sections of the response surfaces of the effective efficiency factor and the specific effective fuel consumption.

RESULTS: Adequate models of second-order regression analysis of changes in effective efficiency factor and specific effective fuel consumption have been obtained. The factor space is described and grapho-analytical studies are carried out. The analysis of regression models and bidimensional sections of response surfaces allowed to determine the optimal values of the studied factors. The method for determining the optimal load and speed ranges of the diesel engine operation, using the multicomponent biofuel composition, has been optimized due to the application of the experimental plan and the description of the factor space by mathematical models, while number of experiments was reduced.

CONCLUSIONS: The optimal area of the combination of the factors is in the range of varying the rotational speed of the diesel engine crankshaft $n=1400...1550$ rpm and the effective load $P_e=0.68...0.85$ MPa at the fuel injection advance angle $\Theta_{inj}=23.5$ degrees to TDC. Considering the variable nature of the load and speed modes of a diesel engine in a real operation environment, the obtained data are of practical interest.

Keywords: diesel fuel; ethanol; rapeseed oil; fuel composition; bench tests; effective indicators; experiment planning.

Cite as:

Plotnikov SA, Kartashevich AN, Simonov MV, Shipin AI. Optimization of the main parameters of the diesel engine during its operation on multicomponent biofuel composition. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(2):91–99. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106567>

Received: 21.04.2022

Accepted: 30.04.2022

Published: 15.05.2022

ВВЕДЕНИЕ

Среди множества известных альтернативных источников энергии особую роль играют биотоплива [1–4]. Они производятся обычно из возобновляемых ресурсов растительного и животного происхождения [5], в связи с чем вызывают повышенный интерес исследователей. Ввиду того, что физико-химические свойства биотоплив существенно отличаются от свойств традиционного дизельного топлива (ДТ) [6], необходима адаптация конструкции двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Наиболее приемлемым путем может быть расширение применяемости альтернативных топлив за счет приближения свойств биотоплив к свойствам ДТ. Использование многокомпонентных биотопливных композиций также может компенсировать отклонение моторного свойства одного ингредиента за счет другого. В результате длительных испытаний к применению был рекомендован состав многокомпонентной биотопливной композиции, включающей следующие ингредиенты, %, масс: РМ – 34,5; этанол – 31,0; ДТ – 34,5 [7]. Стабильность названного состава к коалесценции составляет до 35 ч. Применение предлагаемого состава позволяет также сохранять вязкостно-температурные свойства биотопливной композиции при изменении температуры окружающего воздуха в рамках действующего стандарта [8].

Для качественного анализа рабочих процессов дизеля весьма привлекательно применение современных методов планирования эксперимента [9]. Это позволит наглядно определить допустимые эксплуатационные интервалы его работы при значительном сокращении количества опытов. Кроме того, появляется возможность оценки влияния одних режимных факторов на другие.

Так, исследователями работы [10] разработан алгоритм оптимизации многофакторных планов эксперимента методом ветвей и границ с введением ограничения по дополнительному критерию. Алгоритм позволяет учитывать критерий ограничения, которое накладывается, например, на временную реализацию построенного плана многофакторного эксперимента, либо на величину стоимости плана. Реализация представленного алгоритма позволяет находить два альтернативных плана: с минимальным значением первого критерия, с минимальным значением дополнительного критерия ограничения.

С целью аналитического и графического описания исследуемых процессов, изучения влияния факторов на критерии оптимизации и поиска оптимального сочетания изучаемых факторов в работе [11] был использован метод поверхностей отклика. На основе анализа полученных данных удалось смоделировать разброс параметров транзисторов в процессе производства.

В работе [12] авторами исследовался состав бен-тонита, применяемого в самоупрочнящемся цементе

с целью улучшения его свойств. Применение плана эксперимента Бокса – Бенкена позволило определить оптимальное сочетание ингредиентов самоупрочнящегося цемента для достижения максимальной прочности на сжатие (свыше 45 МПа). Установлено, что состав цемента должен содержать 20% бентонита, соотношение воды к порошку должно равняться 0,45.

На кафедре технологий Нишского университета [13] проводились исследования по оптимизации условий метанолиза подсолнечного масла в ультразвуковом реакторе. На основе использования плана эксперимента Бокса – Бенкена были получены поверхности отклика. Проведенный качественный анализ результатов достоверно обосновал необходимость значения температуры около 40 °С, количества катализатора – 0,7% (в массовых долях), содержания метиловых эфиров жирных кислот (FAME) на уровне 92,2% и молярного отношения метанола к маслу 7,5:1.

Авторы работы [14] исследовали режим работы индуктора, включающий параметры: частоту f , зазор h и плотность тока J . Методом планирования эксперимента на основе плана Бокса – Бенкена было обозначено оптимальное сочетание факторов: $f=1000$ Гц, $h=5$ мм, $J=45$ мм, обеспечивающее требуемую производительность индуктора в условиях, определенных технологическим режимом.

В работе [15] исследовался процесс гидролиза пшеничного глютена (содержание влаги – 6,8%, содержание белка (N 5,70) – 78,52% в пересчете на сухое вещество). Глютен применяется для улучшения качества хлеба, а также в качестве функциональной белковой добавки при производстве различных продуктов питания (например, мясоперерабатывающее производство) с целью улучшения их структуры. Применение плана эксперимента Бокса – Бенкена позволило найти оптимальные рабочие технологические параметры для ферментативного гидролиза пшеничного глютена. Данные показали, что оптимальные функциональные свойства гидролизатов глютена могут быть достигнуты при температуре реакции, равной 40 °С, кислотности среды $pH=9$ и при отношении фермент – глютен, равном 0,5 а.е./г глютена.

В работе [16] авторами исследовался процесс удаления свинца из угля (процесс выщелачивания), добытого в Энугу, с использованием в качестве выщелачивателя различных кислот в различных условиях. Выщелачивание образцов угля перед сжиганием или перед использованием для работы на электростанции необходимо для удаления большей части микроэлементов в этом угле, тем самым уменьшается риск экологического загрязнения. На основе применения ортогонального плана эксперимента второго порядка Бокса – Бенкена были получены параметры, обеспечивающие максимальное выщелачивание угля. Установлена необходимость использования азотной кислоты

HNO_3 в концентрации 0,5 моль, при этом время выщелачивания составляет 32 ч, допустимый размер частиц угля – 63 мкм и потребный объем выщелачивающего вещества (соотношение твердое вещество – жидкость) не превышает 40 мл.

Целью исследований является определение оптимальных режимных характеристик работы дизеля на многокомпонентной биотопливной композиции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные опыты оценки стабильности состава биотопливной композиции производились в химической лаборатории ФГБОУ ВО Вятский государственный

университет. Экспериментальные исследования проводились в испытательной лаборатории УО Белорусская государственная сельскохозяйственная академия.

Общий вид и перечень используемого оборудования и приборов представлен на рис. 1 и в табл. 1.

С целью описания факторного пространства регрессионными моделями, выявления закономерностей влияния нагрузочного и скоростного режима работы дизеля на его эффективные показатели (эффективный КПД η_e , удельный эффективный расход топлива g_e) и определения оптимальных значений факторов был выбран и реализован почти ротатбельный план Бокса – Бенкена второго порядка для трех факторов. Факторы и их уровни (табл. 2) выбирались методом априорного



Рис. 1. Общий вид используемого оборудования и приборов: а – пульт управления дизелем; б – дизель Д-245 на стенде.
Fig 1. General view of the equipment and devices used: а – control panel of a diesel engine; б – The D-245 diesel engine mounted on the test bench.

Таблица 1. Приборы и оборудование в составе экспериментальной установки
Table 1. Devices and equipment as a part of the experimental installation

Вид исследования	Оборудование	Тип, марка	Примечание
Время физической стабильности	Секундомер	СОП Пр-2а-2-010 «АГАТ»	Точность $\pm 0,1$ сек
Стендовые испытания	Автотракторный дизель	Д-245.5S2	Мощность 70 кВт
Топливная экономичность	Расходомер	АИР-50	Точность $\pm 1\%$
Частота вращения	Тахометр	AVL DIS-peed 492	Точность $\pm 5 \text{ мин}^{-1}$
Нагрузка дизеля	Весовое устройство	RAPIDO	Погрешность $\pm 0,2$ кг

Таблица 2. Факторы, уровни фиксирования и интервалы их варьирования
Table 2. Factors, levels of fixation and intervals of their variation

Кодированное обозначение факторов	Название факторов, их обозначение и единица измерения	Уровни факторов			Интервалы варьирования
		1	0	+1	
x_1	Эффективная нагрузка, P_e , МПа	0	0,47	0,94	0,47
x_2	Частота вращения коленчатого вала, n , мин^{-1}	400	600	1800	200
x_3	Угол Θ опережения впрыскивания топлива, градус	10	18	26	8

ранжирования на основании результатов однофакторных экспериментов.

Статистическую обработку данных эксперимента, расчет коэффициентов регрессии, построение поверхностей отклика и их двумерных сечений проводили при помощи программы STATGRAPHICS+ [17].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате реализации опытов плана эксперимента были получены адекватные (по F -критерию Фишера, вероятность $p=0,95$) [18, 19] модели регрессионного анализа второго порядка изменения эффективного КПД η_e и удельного эффективного расхода топлива g_e :

$$\eta_e = 33,0 + 15,3x_1 - 1,3x_2 + 0,5x_3 - 12,3x_1^2 - 0,7x_1 \times x_2 + 0,6x_1 \times x_3 - 0,06x_2^2 - 0,1x_2 \times x_3 - 0,7x_3^2; \quad (1)$$

$$g_e = 258,7 - 230,6x_1 + 9,8x_2 - 3,8x_3 + 208,1x_1^2 + 4,3x_1 \cdot x_2 - 4,2x_1 \cdot x_3 + 0,3x_2^2 + 0,6x_2 \cdot x_3 + 4,8x_3^2. \quad (2)$$

Как видно, часть присутствующих коэффициентов несущественно влияет на результат эксперимента и их можно исключить из рассмотрения.

После исключения из регрессионных моделей (1) и (2) незначимых коэффициентов и пересчета оставшихся уравнения примут вид:

$$\eta_e = 33,0 + 15,3x_1 - 1,3x_2 + 0,5x_3 - 12,3x_1^2 - 0,7x_1 \cdot x_2 + 0,6x_1 \cdot x_3 - 0,7x_3^2; \quad (3)$$

$$g_e = 258,7 - 230,6x_1 + 9,8x_2 - 3,8x_3 + 208,1x_1^2 + 4,3x_1 \cdot x_2 - 4,2x_1 \cdot x_3 + 4,8x_3^2. \quad (4)$$

Анализ регрессионных моделей (3) и (4) показывает (рис. 2), что максимальное в изучаемой области экспериментирования значение эффективного КПД $\eta_e=39,6\%$ и минимальный удельный эффективный расход топлива $g_e=180,2$ г/кВт·ч наблюдаются при практически одинаковых значениях изучаемых факторов.

Так, максимальное значение КПД $\eta_{e \max}$ достигается при $x_1=0,7$ ($P_e=0,66$ МПа), $x_2=-1$ ($n=1400$ мин⁻¹) и $x_3=0,6$ ($\Theta_{\text{впр.}}=23,5$ градуса до ВМТ). Минимальное значение удельного эффективного расхода топлива $g_{e \min}$ получается при значениях факторов $x_1=0,6$ ($P_e=0,56$ МПа), $x_2=-1$ ($n=1400$ мин⁻¹) и $x_3=0,6$ ($\Theta_{\text{впр.}}=23,5$ град. до ВМТ).

Полученные результаты имеют под собой реальный физический смысл. Присутствие в многокомпонентной биотопливной композиции этилового спирта и масла рапса вызывает определенное снижение ее суммарного цетанового числа. В процессе работы дизеля будет иметь место рост периода задержки воспламенения топлива и «заваливание» процесса сгорания за ВМТ. Для компенсации возникающих процессов потребуется некоторое увеличение установочного угла опережения впрыскивания топлива относительно его штатного значения $\Theta_{\text{впр.}}=22$ град.

Работа автотракторного дизеля наиболее экономична в режиме перегрузки, т.е. в интервале снижения частоты коленчатого вала от номинального значения $n=1800$ мин⁻¹ до значения частоты вращения при максимальном крутящем моменте $n=1400$ мин⁻¹.

Наиболее значимо, как на уровень эффективного КПД η_e , так и на значение удельного эффективного расхода топлива g_e и вполне закономерно оказывает влияние изменение эффективной нагрузки P_e . При чем зависимости параметров η_e и g_e от параметра P_e имеют перегиб при $P_e=0,5...0,7$ МПа и варьировании двух

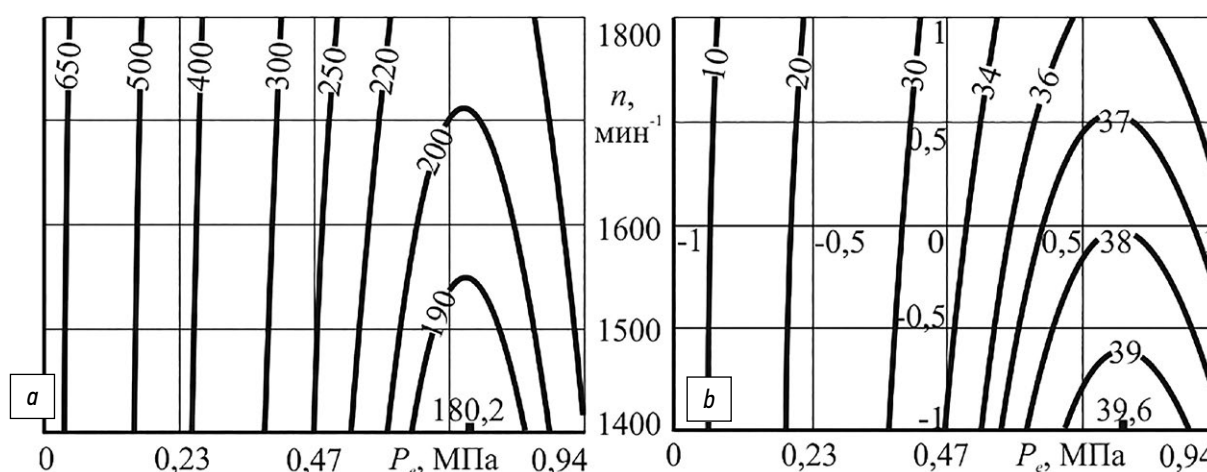


Рис. 2. Двумерные сечения поверхностей отклика при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{впр.}}=23,5$ град.: a – удельный эффективный расход топлива g_e ; b – эффективный КПД η_e .

Fig. 2. Bidimensional sections of response surfaces at the fuel injection advance angle $\Theta_{\text{inj}}=23,5$ deg: a – specific effective fuel consumption g_e ; b – effective efficiency η_e .

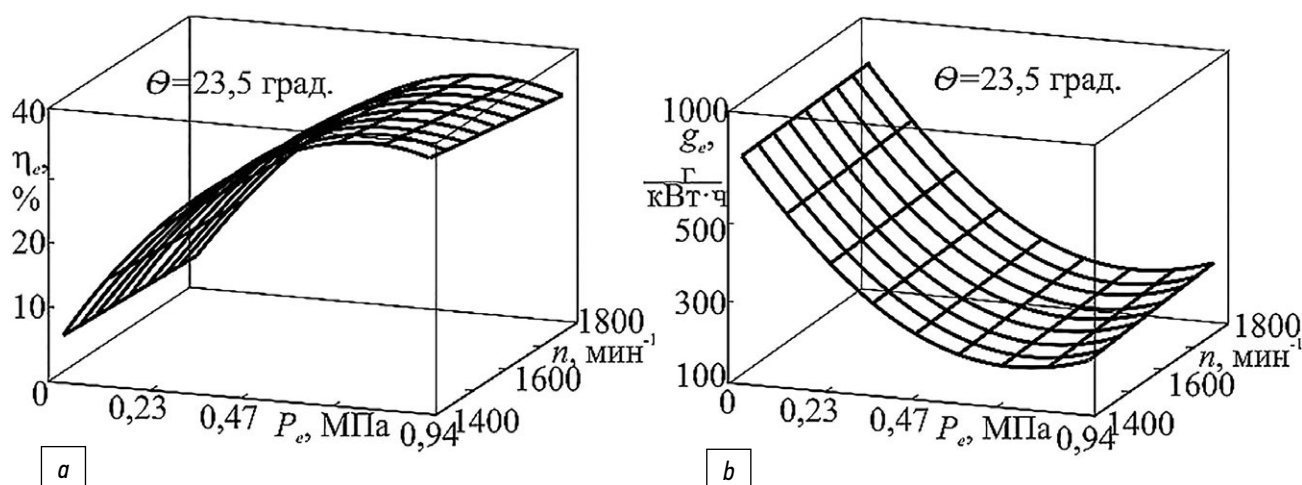


Рис. 3. Зависимости от эффективной нагрузки P_e и частоты n вращения коленчатого вала при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.} = 23,5$ градуса: a – эффективный КПД η_e ; b – удельный эффективный расход топлива g_e .

Fig. 3. Dependencies on effective load P_e and crankshaft rotation speed n at the fuel injection advance angle $\Theta_{inj} = 23.5$ deg.: a – of effective efficiency η_e ; b – of specific effective fuel consumption g_e .

оставшихся факторов во всей исследуемой области экспериментирования.

Данный результат может быть объяснен тем обстоятельством, что наиболее экономичная работа поршневого ДВС обычно достигается в интервале нагружения, составляющем 60...80% от номинального значения нагрузки.

Например, при частоте вращения коленчатого вала дизеля $n = 1400$ мин⁻¹ и угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.} = 23,5$ град. до ВМТ, изменение эффективной нагрузки от 0,47 МПа до 0,6 МПа приводит к увеличению эффективного КПД η_e от 5,6% до 39,6% и уменьшению удельного эффективного

расхода топлива g_e от 694 г/кВт×ч до 180 г/кВт×ч (рис. 3). При дальнейшем увеличении эффективной нагрузки P_e до 0,94 МПа значение эффективного КПД η_e уменьшается до уровня 38,2%, а значение удельного эффективного расхода топлива g_e увеличивается до 220 г/кВт×ч.

Поиск компромиссного решения по оптимальному сочетанию уровней изучаемых факторов проводили методом наложения двумерных сечений поверхностей отклика эффективного КПД η_e и удельного эффективного расхода топлива g_e (рис. 4).

Из графиков видно, что оптимальная область сочетания изучаемых факторов (заштрихованная область на рис. 4) находится в диапазоне варьирования частоты вращения коленчатого вала дизеля $n = 1400...1550$ мин⁻¹ и диапазоне изменения эффективной нагрузки $P_e = 0,68...0,85$ МПа при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.} = 20...25$ град. до ВМТ. При данном сочетании значений факторов обеспечивается практически максимальный в области экспериментирования эффективный КПД η_e (не менее 38%) при невысоком удельном эффективном расходе топлива g_e – не более 200 г/кВт×ч.

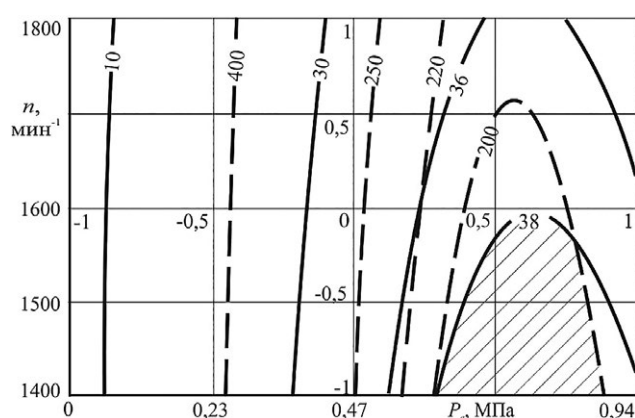


Рис. 4. Двумерные сечения поверхностей отклика эффективного КПД η_e (сплошные линии) и удельного эффективного расхода топлива g_e (пунктирные линии) при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.} = 23,5$ град.

Fig. 4. Bidimensional sections of response surfaces of the effective efficiency η_e (solid lines) and the specific effective fuel consumption g_e (dashed lines) at the fuel injection advance angle $\Theta_{inj} = 23.5$ deg.

Выводы

Оптимизирована методика определения оптимальных нагрузочных и скоростных диапазонов работы дизеля на биотопливной композиции многокомпонентного состава за счет применения плана эксперимента и описания факторного пространства математическими моделями при сокращения количества опытов.

Оптимальная область сочетания факторов находится в диапазоне варьирования частоты вращения

коленчатого вала дизеля $n=1400...1550$ мин⁻¹ и эффективной нагрузки $P_e=0,68...0,85$ МПа при угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр}=23,5$ град. до ВМТ.

Учитывая переменный характер нагрузочных и скоростных режимов дизеля в условиях реальной эксплуатации, представляют практический интерес данные работы дизеля в составе машинотракторного агрегата.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.А. Плотников — общее руководство, постановка задач исследования, утверждение финальной версии; А.Н. Карташевич — подготовка методической и приборной базы исследований, экспертная оценка материала; М.В. Симонов — теоретическая разработка проблемы; А.И. Шипин — проведение практического эксперимента, написание текста рукописи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли равноправный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.A. Plotnikov — general guidance, setting research objectives, approval of the final version; A.N. Kartashevich — preparation of the methodological and instrumental base of research, expert opinion; M.V. Simonov — theoretical development of the problem; A.I. Shipin — conducting a practical experiment, writing the text of the manuscript.

All authors certify that they meet the ICMJE international criteria for authorship.

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плотников С.А. Улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем создания новых альтернативных топлив и совершенствования топливopодающей аппаратуры: автореф. ... дисс. докт. техн. наук. Н-Новгород, 2011. 39 с.
2. Плотников С.А., Смольников М.В., Черемисинов П.А. Расширение многотопливности автотракторного дизеля при использовании альтернативных топлив // Известия МГТУ «МАМИ». 2019. № 3(41). С. 66–72.
3. В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
4. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Черемисинов П.Н. Улучшение смесей дизельного топлива с рапсовым маслом для использования в тракторных дизелях // Двигателестроение. 2017. № 4. С. 21–24.
5. Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания. М.: НИЦ «Инженер», 2016. 292 с.
6. Терентьев Г.А., Тюков В.М., Смаль Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. М.: Химия, 1989. 272 с.
7. Плотников С.А., Глушков М.Н., Карташевич А.Н., Шаповрев В.А. Многокомпонентная биотопливная композиция: заявка на выдачу патента РФ № 2020123967(W20041379) от 20.07.2020.
8. Плотников С.А., Шипин А.И., Карташевич А.Н., Малышкин П.Ю. Способ получения многокомпонентной биотопливной композиции: заявка на выдачу патента РФ № 2020120544(W20035021) от 22.06.2020.
9. Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Simonov M.V., Glushkov M.N. Determining of optimum operation modes of a diesel engine with a multicomponent biofuel composition // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 5th International Scientific and

Practical Seminar Mobility of Transport and Technological Vehicles (MTTV 2020). Nizhny Novgorod, 2021. Vol. 1086, 2021.

10. Кошевой Н.Д., Бурлеев О.Л., Костенко Е.М. Оптимальное планирование эксперимента с введением ограничения по дополнительному критерию // Вестник СумДУ, серия «Технические науки». 2010. Том 2. С. 63–67.
11. Денисенко В.В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2004. № 1. С. 28–34.
12. Arabi N.S., Qadi A.L., Mahmoud B.A. Alhasanah, Ahmad A.L. Dahamsheh, Sleiman A.L. Using of Box-Benken Method to Predict the Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Containing Wadi Musa Bentonite // Jordan. American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 9. Iss. 2. P. 406–411. doi: 10.3844/ajeassp.2016.406.411
13. Jelena M. Avramović, Dragana B. Radosavljević, Ana V. Veličković, Ivan J. Stojković. Statistical modeling and optimization of ultrasound-assisted biodiesel production using various experimental designs // Zastita Materijala. 2019. Vol. 60. Br. 1. P. 70–80. doi: 10.5937/zasmat1901070A
14. Leuca Teodor, Novac Mihaela, Stanciu Bogdan, Burca Adrian, Codrean Marius // Using Minitab-Box Benken Software to Optimize the Induction Heating Process // Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2014. Vol. 7. N.1. P. 73–76.
15. Jelena Jovanovic, Andrea Stefanovic, Natasa Sekuljica, Zorica Knezevic-Jugovic. Production of wheat gluten hydrolysates with improved functional properties: optimization of operating parameters by statistical design // Journal of Hygienic Engineering and Design. 2018. Vol.24. P. 90–100.
16. Okoro Sylvanus Ezenwa, Asadu Christian Oluchukwu, Abuh Mark Agaba. Optimization and Kinetic Modeling of the Removal

of Lead from Enugu Coal by Acid Leaching / // Journal of Energy Research and Reviews. 2019. Vol.3. N.1. P. 1–13. doi: 10.9734/jenrr/2019/v3i13009

17. ГОСТ Р 50.1.040–2002. Статистические методы. Планирование экспериментов. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2002. 39 с.

REFERENCES

1. Plotnikov SA. Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazatelei dizelei putem sozdaniya novykh al'ternativnykh topliv i sovershenstvovaniya toplivopoddayushchei apparatury. [dissertation]. Nizhnii Novgorod: 2011. Rezhim dostupa: <http://www.dslib.net/teplo-dvigateli/uluchshenie-jeksploatatsionnyh-pokazatelej-dizelej-putem-sozdaniya-novyh.html> (In Russ).
2. Plotnikov SA, Smol'nikov MV, Cheremisinov PA. The extension of multi-fuel capacity of automotive diesel engine using alternative fuels. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2019;(3):66–72. (In Russ).
3. L'otko V, Lukanin VN, Khachiyani AS. Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya. Moscow: Izd-vo MADI (TU); 2000. (In Russ).
4. Plotnikov SA, Kartashevich AN, Cheremisinov PN. Uluchshenie smesei dizel'nogo topliva s rapsovyim maslom dlya ispol'zovaniya v traktornykh dizelyakh. *Dvigatelistroenie*. 2017;(4):21–24. (In Russ).
5. Markov VA, Devyanin SN, Zykov SA, Gaidar SM. Biotopliva dlya dvigatelei vnutrennego sgoraniya. Moscow: NITs «Inzhener»; 2016. (In Russ).
6. Terent'ev GA, Tyukov VM, Smal' FV. Motornye topliva iz al'ternativnykh syr'evykh resursov. Moscow: Khimiya, 1989. (In Russ).
7. Patent RUS № 2020123967/ 29.07.2020. Plotnikov SA, Glushkov MN, Kartashevich AN, Shaporev VA. Mnogokomponentnaya biotoplivnaya kompozitsiya. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46477534> (In Russ).
8. Patent RUS № 2020120544/ 22.06.2020. Plotnikov SA, Shipin AI, Kartashevich AN, Malyshevskiy PYu. Sposob polucheniya mnogokomponentnoi biotoplivnoi kompozitsii. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44759434> (In Russ).
9. Plotnikov SA, Kartashevich AN, Simonov MV, Glushkov MN. Determining of optimum operation modes of a diesel engine with a multicomponent biofuel composition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1086(1). doi: 10.1088/1757-899x/1086/1/012014

18. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов. М.: Пищевая промышленность, 1979. 200 с.

19. Мельников С.В., Алёшкин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.

10. Koshevoi ND, Burleev OL, Kostenko EM. Optimal'noe planirovanie eksperimenta s vvedeniem ogranicheniya po dopolnitel'nomu kriteriyu. *Vestnik SumDU*. 2010;2:63–67. (In Russ).

11. Denisenko VV. Modelirovanie razbrosa parametrov tranzistorov v KMOP SBIS. *Komponenty i tekhnologii*. 2004;(1):28–34.

12. Al Qadi ANS, Alhasanat MBA, Dahamsheh AAL, Zaidneen SAL. Using of Box-Benken Method to Predict the Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Containing Wadi Musa Bentonite, Jordan. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;9(2):406–411. doi: 10.3844/ajeassp.2016.406.411

13. Avramović JM, Radosavljević DB, Veličković AV, et al. Statistical modeling and optimization of ultrasound-assisted biodiesel production using various experimental designs. *Zastita Materijala*. 2019;60(1):70–80. doi:10.5937/zasmat1901070A

14. Leuca T, Novac M, Stanciu B, et al. Using Minitab-Box Benken Software to Optimize the Induction Heating Process. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2014;7(1):73–76.

15. Jovanovic J, Stefanovic A, Sekuljica N, Knezevic-Jugovic Z. Production of wheat gluten hydrolysates with improved functional properties: optimization of operating parameters by statistical design // *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2018;24:90–100.

16. Agaba AM, Oluchukwu AC, Ezenwa OS. Optimization and Kinetic Modeling of the Removal of Lead from Enugu Coal by Acid Leaching. *Journal of Energy Research and Reviews*. 2019:1–13. doi: 10.9734/jenrr/2019/v3i130090

17. GOST R 50.1.040–2002. Statisticheskie metody. Planirovanie eksperimentov. Terminy i opredeleniya. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200030727> (In Russ).

18. Grachev YuP. Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov. Moscow: Pishchevaya promyshlennost'; 1979. (In Russ).

19. Mel'nikov SV, Aleshkin VR, Roshchin PM. Planirovanie eksperimenta v issledovaniyakh sel'skokhozyaistvennykh protsessov. Leningrad: Kolos; 1980. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

***Плотников Сергей Александрович,**

доцент, д.т.н.,

профессор кафедры «Технология машиностроения»;

адрес: Россия, 610000, Киров, ул. Московская, д. 36;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>;

eLibrary SPIN: 4899-9362;

e-mail: PlotnikovSA@bk.ru

AUTHORS' INFO

***Sergey A. Plotnikov,**

Associate Professor, Dr. Sci. (Engin.),

Professor of the Mechanical Engineering Technology Department;

address: 36 Moskovskaya Str., Kirov, 610000, Russia;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>;

eLibrary SPIN: 4899-9362;

e-mail: PlotnikovSA@bk.ru

Карташевич Анатолий Николаевич,

профессор, д.т.н.,
заведующий кафедрой «Тракторы, автомобили и машины
для природообустройства»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>;
eLibrary SPIN: 8541-5330;
e-mail: Kartashevich@yandex.ru

Симонов Максим Васильевич,

доцент, д.т.н.,
доцент кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3805-9246>;
eLibrary SPIN: 1216-7568;
e-mail: simaksim@mail.ru

Шипин Александр Игоревич,

аспирант кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9678-9389>;
eLibrary SPIN: 2676-6575;
e-mail: shipin95@gmail.com

*Автор для переписки

Anatoliy N. Kartashevich,

Dr. Sci. (Engin.), Professor,
Head of the Tractors, Vehicles and Machines for Environmental
Management Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>;
eLibrary SPIN: 8541-5330;
e-mail: Kartashevich@yandex.ru

Maksim V. Simonov,

Associate Professor, Dr. Sci. (Engin.),
Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology
Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3805-9246>;
eLibrary SPIN: 1216-7568;
e-mail: simaksim@mail.ru

Alexandr I. Shipin,

Postgraduate of the Mechanical Engineering Technology
Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9678-9389>;
eLibrary SPIN: 2676-6575;
e-mail: shipin95@gmail.com

*Corresponding author