

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА СМЕСЕВОМ ТОПЛИВЕ

А. Н. КАРТАШЕВИЧ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: kartashevich@yandex.ru

Ш. В. БУЗИКОВ, С. А. ПЛОТНИКОВ

Вятский государственный университет,
г. Киров, Россия, e-mail: plotnikovsa@bk.ru

(Поступила в редакцию 03.11.2022)

Проблема определения оптимальных эффективных показателей тракторного дизеля при работе на смешанном топливе является весьма актуальной. Для решения данной проблемы необходимо определить целевую функцию оптимизации эффективных показателей, а затем граничные условия. В связи с этим целью работы является оптимизация эффективных показателей тракторного дизеля при работе на смешанном топливе. Научная новизна работы заключается в определении оптимальных зависимостей эффективных показателей тракторного дизеля при работе на смешанном топливе. Для достижения поставленной цели необходимо решить несколько задач. Во-первых, определить саму целевую функцию эффективных показателей. Во-вторых, определить граничные условия и произвести расчёт. Расчёт критерия оптимизации эффективных показателей был произведён для всех рабочих нагрузочных и скоростных режимов работы тракторного дизеля марки Д-245.5S2 размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ, состоящим из ДТ и рапсового масла (РМ). В результате проведённых исследований был определен критерий оптимизации эффективных показателей тракторного дизеля при работе на смешанном топливе. Проведенный анализ результатов расчёта критерия оптимизации эффективных показателей тракторного дизеля марки Д-245.5S2 размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ, состоящим из ДТ и РМ показал, что при увеличении РМ в СТ (Mat) от 0 до 80, p_e от 0,2 до 1,0 МПа, а также n от 1200 до 1800 мин^{-1} приводит к улучшению эффективных показателей до 28 %. При увеличении доли Mat от 30 до 80 %, снижении p_e от 0,6 до 0,2 МПа и n от 1800 до 1200 мин^{-1} , приводит к ухудшению эффективных показателей до 23 %.

Ключевые слова: целевая функция, эффективные показатели, показатели механических потерь, смешанное топливо, критерий оптимизации.

The problem of determining the optimal performance indicators of a tractor diesel engine when operating on mixed fuel is very relevant. To solve this problem, it is necessary to determine the objective function for optimizing effective indicators, and then the boundary conditions. In this regard, the aim of the work is to optimize the effective performance of a tractor diesel engine when operating on mixed fuel. The scientific novelty of the work lies in determining the optimal dependencies of the effective indicators of a tractor diesel engine when operating on mixed fuel. To achieve this goal, it is necessary to solve several problems. First, to determine the target function of effective indicators. Secondly, determine the boundary conditions and make a calculation. The calculation of the optimization criterion for effective indicators was made for all operating load and speed modes of operation of a tractor diesel engine of the D-245.5S2 brand with a dimension of 4ChN 11.0 / 12.5 when working on mixed fuel consisting of diesel fuel and rapeseed oil. As a result of the research, a criterion was determined for optimizing the effective performance of a tractor diesel engine when operating on mixed fuel. The analysis of the results of calculating the optimization criterion for the effective performance of a D-245.5S2 tractor diesel engine with a dimension of 4ChN 11.0 / 12.5 when working on mixed fuel consisting of diesel fuel and rapeseed oil showed that with an increase in rapeseed oil in mixed fuel (Mat) from 0 to 80 p_e from 0.2 to 1.0 MPa, as well as n from 1200 to 1800 min^{-1} leads to an improvement in effective performance up to 28 %. With an increase in the share of Mat from 30 to 80 %, a decrease in p_e from 0.6 to 0.2 MPa and n from 1800 to 1200 min^{-1} , the effective indicators deteriorate to 23 %.

Key words: objective function, effective indicators, mechanical loss indicators, mixed fuel, optimization criterion.

Введение

Работа тракторного дизеля при использовании смешанного топлива на различных нагрузочных и скоростных режимах, как правило, характеризуется сопровождением изменения значений эффективной мощности [1, 2]. В свою очередь такой эффективный показатель можно рассмотреть, как функцию двух аргументов. Этими двумя аргументами здесь являются значения среднего эффективного давления и частоты вращения коленчатого вала тракторного дизеля [3, 4].

В зависимости от скоростного режима работы тракторного дизеля среднее эффективное давление не может изменяться от минимального до максимального возможного своих значений [5, 6]. Данное обстоятельство объясняется, во-первых, конструктивно-технологическими особенностями самого тракторного дизеля, а, во-вторых, характеристикой работы всережимного регулятора частоты вращения коленчатого вала тракторного дизеля топливного насоса высокого давления [7, 8]. Так как всережимный регулятор частоты вращения коленчатого вала на разных скоростных режимах работы обеспечивает разные значения максимальной цикловой подачи, тем самым определяя максимальное зна-

чение среднего эффективного давления [9, 10]. Таким образом, в зависимости от частоты вращения коленчатого вала тракторного дизеля можно определить функцию ограничения значений среднего эффективного давления [11, 12].

В связи с этим возникает проблема определения оптимизации эффективных показателей тракторного дизеля при работе на смесевом топливе.

Для решения данной проблемы необходимо определить целевую функцию оптимизации эффективных показателей, а затем граничные условия.

В связи с этим целью работы является оптимизация эффективных показателей тракторного дизеля при работе на смесевом топливе. Научная новизна работы заключается в определении оптимальных зависимостей эффективных показателей тракторного дизеля при работе на смесевом топливе.

Основная часть

Так как значение среднего эффективного давления p_e во многом определяется цикловой подачей смесевого топлива $q_{ц}$, то введение ограничений на значение p_e сводится к характеристике всережимного регулятора частоты вращения коленчатого вала топливного насоса высокого давления и её можно представить как кусочно-заданную функцию в виде полинома-сплайна 2 порядка.

Рассмотрим систему функций:

$$\begin{cases} p_{мп} = f_{мп}(n) \\ p_{мп} \leq p_e \leq f_e(n) \end{cases} \quad (1)$$

где $p_{мп}$ – давление механических потерь, МПа; $f_{мп}(n)$ – функция давления механических потерь от частоты вращения коленчатого вала, МПа; n – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} ; $f_e(n)$ – функция среднего эффективного давления от частоты вращения коленчатого вала, МПа.

Отсюда видно, что равенство, как и неравенство, выражается через одну переменную n . Данная система (1) является определенной на отрезке $[n_{xx}^{min}, n_{xx}^{max}]$ с узлами $n \in [n_{xx}^{min} \leq n_{ндк} < n_{кдк} < n_{ндр} \leq n_{xx}^{max}]$, т.к. на каждом из отрезков $[n_{xx}^{min}, n_{ндк}]$, $[n_{ндк}, n_{кдк}]$, $[n_{кдк}, n_{ндр}]$ и $[n_{ндр}, n_{xx}^{max}]$, $f(n)$ можно выразить алгебраическим полиномом 2 степени, тогда каждая из точек $n_{ндк}$, $n_{кдк}$, $n_{ндр}$ является узлами сплайна [9]. В общем виде кусочно-заданную систему функций можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} p_{мп} = a_{мп}n^2 + b_{мп}n + c_{мп}, & n_{xx}^{min} \leq n \leq n_{xx}^{max} \\ p_{мп} \leq p_e(n) \leq a_i n^2 + b_i n + c_i, & \begin{matrix} n_{xx}^{min} < n < n_{ндк}, & i = 1 \\ n_{ндк} < n < n_{кдк}, & i = 2 \\ n_{кдк} < n < n_{ндр}, & i = 3 \\ n_{ндр} < n < n_{xx}^{max}, & i = 4 \end{matrix} \end{cases} \quad (2)$$

где n_{xx}^{min} , n_{xx}^{max} – минимальная и максимальная частота холостого хода тракторного дизеля, мин^{-1} ; $n_{ндк}$, $n_{кдк}$, $n_{ндр}$ – частота вращения коленчатого вала тракторного дизеля, соответствующая началу и концу действия корректора, а также началу действия регулятора, соответственно, мин^{-1} ; i – текущий номер режима работы тракторного дизеля; $a_{мп}$, $b_{мп}$, $c_{мп}$, a_i , b_i , c_i – коэффициенты в полиномах 2 степени.

Система функций (2) определяет границы области нагрузочных и скоростных режимов работы тракторного дизеля, установленные заводом-изготовителем.

Тогда с учётом выражений (1) и (2) в общем виде систему уравнений, определяющую границы области значений эффективной мощности N_e в зависимости только лишь от одной переменной n можно представить:

$$\begin{cases} N_{мп} = \frac{V_l}{30\tau} = (a_{мп}n^2 + b_{мп}n + c_{мп})n, & n_{xx}^{min} \leq n \leq n_{xx}^{max} \\ N_{мп} \leq N_e \leq \frac{V_l}{30\tau} (a_i n^2 + b_i n + c_i)n, & \begin{matrix} n_{xx}^{min} < n < n_{ндк}, & i = 1 \\ n_{ндк} < n < n_{кдк}, & i = 2 \\ n_{кдк} < n < n_{ндр}, & i = 3 \\ n_{ндр} < n < n_{xx}^{max}, & i = 4 \end{matrix} \end{cases} \quad (3)$$

Выражение (3) определяет область режимов работы тракторного дизеля, установленного заводом-изготовителем, зависящее от конструктивно-технологических параметров самого тракторного дизеля и характеристик топливоподачи топливного насоса высокого давления. В связи с этим, очень важно,

изменяя какие-либо показатели тракторного дизеля, обеспечить соблюдение его режимов работы, ограниченные описанной областью значений, согласно выражению (2), графически это определяется усеченной поверхностью (рис. 1).

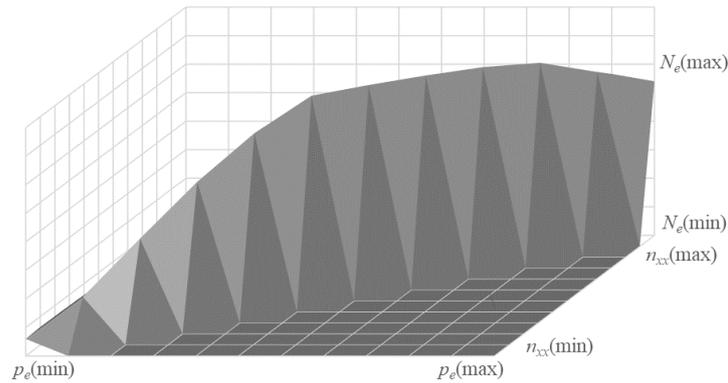


Рис. 1. Область режимов работы тракторного дизеля

Под эффективными показателями тракторного дизеля следует понимать две основные группы показателей – индикаторные и механических потерь [10].

Каждую подгруппу показателей можно представить, как сложную целевую функцию с двумя общими аргументами. Таким образом, для индикаторных показателей:

$$P_i = f\{N_i(p_i, n), \eta_i(p_i, n), g_i(p_i, n)\}, \quad (4)$$

где P_i – целевая функция индикаторных показателей; $N_i(p_i, n)$ – функция индикаторной мощности; $\eta_i(p_i, n)$ – функция индикаторного КПД; $g_i(p_i, n)$ – функция индикаторного удельного расхода смешанного топлива; p_i – среднее индикаторное давление, МПа.

Для показателей механических потерь:

$$P_{мп} = f\{N_{мп}(p_i, n), \eta_m(p_i, n)\}, \quad (5)$$

где $P_{мп}$ – целевая функция показателей механических потерь.

Рассмотрим целевую функцию индикаторных показателей. Функция индикаторной мощности:

$$N_i = \frac{V_l}{30\tau} p_i n. \quad (6)$$

Функция индикаторного КПД:

$$\eta_i = \frac{1}{H_u} p_i \frac{G_B}{G_T \rho_k \eta_v}, \quad (7)$$

где $\frac{1}{H_u}$ – удельная тепловая масса смешанного топлива, кг/МДж [11]; $\frac{G_B}{G_T \rho_k \eta_v}$ – удельный объем рабочей смеси, состоящей из свежего заряда (воздуха), отработавших газов и смешанного топлива, м³/кг топл.; H_u – низшая расчетная удельная теплота сгорания смешанного топлива, МДж/кг; G_B – массовый часовой расход воздуха, кг/ч; G_T – массовый часовой расход смешанного топлива, кг/ч; ρ_k – плотность свежего заряда на впуске, кг/м³; η_v – коэффициент наполнения цилиндров тракторного дизеля.

В последнем выражении (7) произвели замену [12]: $\eta_v = \frac{33,3G_B}{V_l n \rho_k}$ и преобразовали, тогда удельный объем рабочей смеси, определялся как $\frac{V_l n}{33,3G_T}$.

Тогда окончательно выражение (7) приняло вид:

$$\eta_i = \frac{V_l}{33,3H_u G_T(p_i, n)} p_i n. \quad (8)$$

Проведя аналогичные преобразования получено:

$$g_i = \frac{1,2 \cdot 10^5 G_T(p_i, n)}{V_l} \frac{1}{p_i n}. \quad (9)$$

Тогда общая целевая функция индикаторных показателей с учетом выражений (6), (8) и (9):

$$P_i = f\left\{\frac{V_l}{30\tau} p_i n, \frac{V_l}{33,3H_u G_T(p_i, n)} p_i n, \frac{1,2 \cdot 10^5 G_T(p_i, n)}{V_l} \frac{1}{p_i n}\right\}. \quad (10)$$

Целевая функция для показателей механических потерь. Мощность механических потерь:

$$N_{мп} = \frac{V_l}{30\tau} P_{мп} n. \quad (11)$$

Механический КПД:

$$\eta_M = \frac{p_e}{p_i} = 1 - \frac{p_{мп}}{p_i}. \quad (12)$$

С учётом выражений (11) и (12) в конечном виде:

$$P_{мп} = f \left\{ \frac{V_l}{30\tau} p_{мп} n, 1 - \frac{p_{мп}}{p_i} \right\}. \quad (13)$$

Исходя из условия $p_e = p_i - p_{мп}$ и анализа целевых функций (10) и (13) следует что, можно сформировать такую единую целевую функцию эффективных показателей, которая будет заменять в себе две, исключив из неё коррелирующие подфункции. Тогда общее выражение целевой функции эффективных показателей приняло следующий вид:

$$P_e = f \left\{ p_i n, \frac{V_l}{33,3H_u} p_i n, \frac{1,2 \cdot 10^5}{V_l} \frac{1}{p_i n}, p_{мп} n, 1 - \frac{p_{мп}}{p_i} \right\}. \quad (14)$$

Используя выражение (14), можно проводить поиск любых оптимальных решений, задаваясь определенными условиями.

Выражение (14) позволяет определить минимальное значение критерия оценки оптимального значения улучшения эффективных показателей тракторного дизеля на смесевом топливе (СТ) по сравнению с работой на чистом дизельном топливе (ДТ) в зависимости от нагрузочного и скоростного режимов работы.

Изменяя состав смесевого топлива, применяемого в тракторном дизеле в зависимости от его нагрузочных и скоростных режимов, работы можно получить максимальное улучшение эффективных показателей тракторного дизеля.

Расчёт критерия оптимизации эффективных показателей для всех рабочих нагрузочных и скоростных режимов работы тракторного дизеля марки Д-245.5S2 размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ, состоящим из ДТ и рапсового масла (РМ) показал следующие результаты, представленные в таблице.

Результаты теоретических расчётов значения P_e для СТ, состоящего из ДТ и РМ для всех нагрузочных и скоростных режимов работы Д-245.5S2

n, мин ⁻¹	p _e , МПа					РМ, %
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	
1200	1,08	1,07	1,06	1,03	0,99	20
1350	1,06	1,05	1,04	1,01	0,96	20
1500	1,05	1,04	1,03	0,99	0,92	20
1650	1,03	1,02	1,01	0,97	0,88	20
1800	1,02	1,01	0,99	0,95	0,84	20
1200	1,13	1,11	1,07	1,01	0,94	40
1350	1,11	1,09	1,05	0,98	0,90	40
1500	1,10	1,07	1,02	0,95	0,86	40
1650	1,08	1,05	1,00	0,92	0,82	40
1800	1,06	1,03	0,98	0,89	0,78	40
1200	1,17	1,13	1,08	0,99	0,91	60
1350	1,15	1,10	1,05	0,96	0,87	60
1500	1,13	1,07	1,01	0,92	0,83	60
1650	1,11	1,04	0,98	0,89	0,79	60
1800	1,09	1,01	0,95	0,86	0,75	60
1200	1,23	1,17	1,09	0,97	0,88	80
1350	1,20	1,13	1,05	0,93	0,84	80
1500	1,17	1,09	1,00	0,90	0,80	80
1650	1,14	1,05	0,96	0,86	0,76	80
1800	1,11	1,02	0,92	0,82	0,72	80

Графическая зависимость критерия оценки оптимального состава СТ P_e при добавке РМ для всех нагрузочных и скоростных режимов работы ТД представлена на рис. 2.

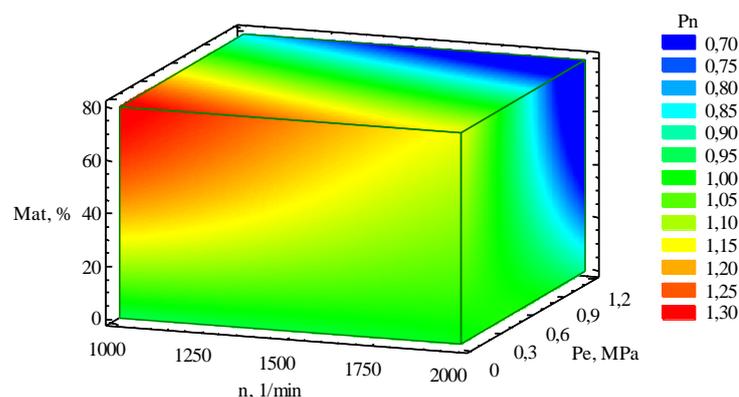


Рис. 2. Зависимость критерия оценки оптимального состава СТ P_e при использовании ДТ и РМ для всех нагрузочных и скоростных режимов работы тракторного дизеля

Анализ полученных расчётных данных (таблица) и (рис. 2) показал, что при увеличении РМ в СТ (Mat) от 0 до 80, p_e от 0,2 до 1,0 МПа, а также n от 1200 до 1800 мин⁻¹ приводит к улучшению эффективных показателей до 28 % (P_e). Также наблюдается ухудшение эффективных показателей до 23 % (P_e) при увеличении Mat от 30 до 80%, снижении p_e от 0,6 до 0,2 МПа и n от 1800 до 1200 мин⁻¹.

Заключение

В результате проведённых исследований был определен критерий оптимизация эффективных показателей тракторного дизеля при работе на смешанном топливе.

Проведенный анализ результатов расчёта критерия оптимизации эффективных показателей тракторного дизеля марки Д-245.5S2 размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ, состоящим из ДТ и РМ показал, что при увеличении РМ в СТ (Mat) от 0 до 80, p_e от 0,2 до 1,0 МПа, а также n от 1200 до 1800 мин⁻¹ приводит к улучшению эффективных показателей до 28 %.

При увеличении доли Mat от 30 до 80%, снижении p_e от 0,6 до 0,2 МПа и n от 1800 до 1200 мин⁻¹, приводит к ухудшению эффективных показателей до 23 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусак, А. А. Справочник по высшей математике / А. А. Гусак, Г. М. Гусак, Е. А. Бричкова. – Минск: ТетраСистемс, 2009. – 638 с.
2. Investigation of the combustion process of a diesel engine when working on a mixed fuel / S. V. Buzikov, S. A. Plotnikov, A. I. Shipin [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 6, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2021 года. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 042052. – DOI 10.1088/1755-1315/981/4/042052.
3. Карташевич, А. Н. Улучшение экологических показателей автотракторных двигателей с применением биогаза и сурепного масла / А. Н. Карташевич, Р. С. Даргель, В. А. Шаповров // От импортозамещения к экспортному потенциалу: научно-инновационное обеспечение разработки и внедрения ресурсосберегающих технологий, технических средств и цифровой платформы АПК, Екатеринбург, 25–26 февраля 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2021. – С. 81–83.
4. Грудович, Е. Д. Влияние на экологические показатели альтернативных видов топлива на основе растительных масел / Е. Д. Грудович, А. Н. Карташевич // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия. Том Выпуск 6. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. – С. 194–198.
5. Колчин, А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – 4 – изд., стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 496 с.
6. Long L., Yuanheng T., Dai L. Investigation of future low-carbon and zero-carbon fuels for marine engines from the view of thermal efficiency / Energy Reports, Vol 8, 2022, Pp 6150-6160, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.058>.
7. ГОСТ 18509-88 Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний (с Изменением N 1).
8. Plotnikov S. Environmental Properties Evaluation of Spark-Ignition Engines Running on Water/Fuel Mix / S. Plotnikov, S. Buzikov, A. Birukov // Lecture Notes in Mechanical Engineering (см. в книгах). – 2022. – P. 451-460. – DOI 10.1007/978-3-030-85233-7_55.
9. Бузиков, Ш. В. Анализ концепций исследования применения альтернативных топлив в дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников // Транспорт на альтернативном топливе. – 2022. – № 1(85). – С. 66–70.
10. Бузиков, Ш. В. Обоснование методов определения эффективности применения альтернативных топлив в автотракторных дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников // Известия МГТУ МАМИ. – 2021. – Т. 15. – № 4. – С. 2–8. – DOI 10.31992/2074-0530-2021-50-4-2-8.
11. Бузиков, Ш. В. Определение предельной концентрации рапсового масла в смешанном топливе применяемое в дизеле / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, И. С. Козлов // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 1(85). – С. 72–79.
12. Бузиков, Ш. В. Определение эффективности применения смешанного топлива в тракторных дизелях / Ш. В. Бузиков // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 5(89). – С. 57–62.