

Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 2 (58). С. 90-98
Vestnik Kurganskoy GSNA. 2026; (2-58): 90-98

Научная статья

УДК 621.436

Код ВАК 4.3.1

DOI: 10.52463/2227-4227_2026_58_90_98

EDN: ANQPMU

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВОПОДАЧИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Юрий Ахметханович Шекихачев¹✉, Руслан Асланбиевич Балкаров²,
Амур Григорьевич Фиापшев³, Людмила Зачиевна Шекихачева⁴, Тимур Муаедович Апхудов⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова,
Нальчик, Россия

¹ shek-fmep@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6300-0823>

² rus.balkarov.52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8946-7867>

³ energo.kbr@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3080-0901>

⁴ sh-ludmila-z@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5987-1500>

⁵ aphudov75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9304-1324>

Аннотация. Характер топливоподачи предопределяет показатели, характеризующие качество протекания рабочего процесса в дизельном двигателе. В процессе эксплуатации дизельного двигателя имеют место существенные различия между реальными характеристиками топливоподачи и оптимальными. Цель исследования – установление оптимальных параметров, характеризующих топливоподачу в процессе эксплуатации топливной аппаратуры. Процесс оптимизации параметров топливоподачи и показателей рабочего процесса дизельных двигателей осуществляется путем многофакторного математического моделирования. При оптимизации использована методика многофакторного математического моделирования на базе метода узловых точек. Гидродинамический расчет подачи топлива позволил выделить факторы, определяющие характеристики процесса впрыска и качественные показатели, характеризующие течение рабочего процесса в дизельном двигателе: цикловая подача топлива (ЦПТ), давление впрыска, угол запаздывания впрыска, длительность впрыска. Получены многофакторные математические модели параметров подачи топлива, реализация которых позволяет обосновать параметры стендовых форсунок и топливопроводящей системы, установить значения элементов топливной системы высокого давления, которые обеспечат равномерную цикловую подачу топлива. Значение экстремума критерия оптимизации (индикаторный КПД) имеет место при угле запаздывания впрыска 24,96...°, длительности впрыска 20...°, цикловой подаче топлива 0,0507 г/цикл. Следовательно, указанные величины можно считать оптимальными для дизельного двигателя 4С11/12,5. В этом случае индикаторными показателями указанного дизеля являются: индикаторная мощность 17,41 кВт, индикаторный удельный расход топлива 192,8 г/кВт·ч, максимальное давление газов 0,8 МПа. Параметры топливоподачи в основном определяются техническим состоянием распылителя форсунок и нагнетательного клапана, а также давлением впрыскивания и цикловой подачей топлива.

Ключевые слова: дизельный двигатель, топливная аппаратура, топливоподача, оптимизация, топливный насос.

Благодарности: работа финансировалась за счет средств бюджета Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета. Дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Для цитирования: Шекихачев Ю.А., Балкаров Р.А., Фиапшев А.Г., Шекихачева Л.З., Апхудов Т.М. Оптимизация параметров топливоподачи и показателей рабочего процесса дизельных двигателей // Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 2 (58). С. 90-98. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_58_90_98. EDN: ANQPMU.

Scientific article

OPTIMIZATION OF FUEL SUPPLY PARAMETERS AND OPERATING PROCESS PERFORMANCE OF DIESEL ENGINES

Yuri A. Shekikhachev¹✉, Ruslan A. Balkarov², Amur G. Fiapshev³, Lyudmila Z. Shekikhacheva⁴, Timur M. Aphudov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, Nalchik, Russia

¹ shek-fmep@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6300-0823>

² rus.balkarov.52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8946-7867>

³ energo.kbr@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3080-0901>

⁴ sh-ludmila-z@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5987-1500>

⁵ aphudov75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9304-1324>

Abstract. The nature of the fuel supply determines the indicators that characterize the quality of the diesel engine operation behaviour. During diesel engine operation, there are significant differences between the actual fuel supply characteristics and the optimal ones. The purpose of the study is to establish optimal parameters characterizing fuel supply during fuel equipment operation. The process of optimizing fuel supply parameters and diesel engine operating parameters is carried out through multifactorial mathematical modeling. During optimization, the technique of multifactorial mathematical modeling based on the nodal point method was used. The hydrodynamic calculation of the fuel supply made it possible to identify the factors determining the characteristics of the injection process and the qualitative indicators characterizing the diesel engine operation such as cyclic fuel supply (CFS), injection pressure, injection delay angle, injection duration. Multifactorial mathematical models of fuel supply parameters have been obtained, the implementation of which makes it possible to justify the parameters of bench injectors and the fuel-line system, to establish the values of the elements of the high-pressure fuel system, which will ensure uniform cyclic fuel supply. The extremum value of the optimization criterion (indicated efficiency) occurs at an injection delay angle of 24.96° , an injection duration of 20° , and a cyclic fuel supply of 0.0507 g/cycle. Therefore, these values can be considered optimal for a 4Ч11/12.5 (four cylinder four-stroke cycle) diesel engine. In this case, the indicator values of the specified diesel engine are as follows the indicator power is 17.41 kW, the indicator specific fuel consumption is 192.8 g/kWh, the maximum gas pressure is 0.8 MPa. The fuel supply parameters are mainly determined by the technical condition of the injector atomizer and the fuel pump delivery valve, as well as the injection pressure and cyclic fuel supply.

Keywords: diesel engine, fuel equipment, fuel supply, optimization, fuel pump.

Acknowledgments: the work was funded from the budget of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University. No additional grants were received to conduct or direct this particular study.

For citation: Shekikhachev Yu.A., Balkarov R.A., Fiapshev A.G., Shekikhacheva L.Z., Aphudov T.M. Optimization of fuel supply parameters and operating process performance of diesel engines // Vestnik Kurganskoy GSHA. 2026; (2-58): 90-98. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_58_90_98. EDN: AHQPMU. (In Russ).

Введение. Характер топливоподачи предопределяет показатели, характеризующие качество протекания рабочего процесса в дизельном двигателе. Как известно, в процессе эксплуатации дизельного двигателя имеют место существенные различия между реальными характеристиками топливоподачи и оптимальными [1; 2]. Указанные различия возникают вследствие того, например, что изменяется техническое состояние элементов топливной системы высокого давления [3–5]. Отклонение параметров топливоподачи от установленных оптимальных значений, которое имеет место в эксплуатации, может привести к ухудшению показателей работы дизеля [6].

Увеличение неидентичности подачи топлива секциями топливного насоса УТН-5 более 8 % оказывает существенное влияние на мощностные и экономические показатели работы дизеля, как на номинальном режиме, так и на частичных нагрузочных режимах [7–9].

Установление оптимальных параметров, характеризующих топливоподачу в процессе эксплуатации топливной аппаратуры, – довольно сложная задача, что вызвано взаимосвязанностью и взаимообусловленностью указанных параметров. Неидентичность таких параметров, как цикловая подача, угол начала впрыска топлива, характеристики впрыска, – причина различного характера протекания рабочего процесса в них и, естественно, различия индикаторных показателей работы дизельного двигателя. К примеру, при эксплуатации дизельных двигателей, которые форсированы по коэффициенту избытка воздуха, указанное обстоятельство является причиной ухудшения топливной экономичности и интенсивного износа деталей цилиндро-поршневой группы. Работа двигателей тракторов на неустановившихся режимах сопровождается рядом специфических особенностей, проявляющихся в своеобразии

закономерностей изменения энергетических и др. параметров. При установившихся режимах неравномерность среднего индикаторного давления по цилиндрам двигателя может достигать 30 %, тогда как в соответствующих установившихся режимах она составляет 10 %. В реальных условиях эксплуатации перегрузка отдельных цилиндров ведет к снижению топливной экономичности на 19...15 %. Она также вызывает высокие термические нагрузки и приводит к увеличению дымности отработавших газов дизеля. Для двигателей со свободным пуском уменьшение воздушного заряда цилиндров в неустановившихся режимах составляет 8...12 %. При этом характерно увеличение в 1,5...2 раза неравномерности распределения воздуха по цилиндрам [10–12].

Необходимо учитывать, что, оптимизируя одни параметры топливоподачи, зачастую ухудшаются другие.

Наибольшее влияние на нестабильность эффективной мощности дизеля оказывают топливные насосы высокого давления. Особенно неблагоприятно сказывается повышенная неравномерность цикловой подачи топлива по секциям топливного насоса высокого давления на пусковых качествах дизеля. Величины действительного и геометрического активных ходов плунжера в процессе работы топливного насоса высокого давления отличаются друг от друга, так как геометрически активный ход определяется в процессе проливки на неработающем насосе. Важно, что в результате движения плунжера с существенной скоростью процесс сжатия топлива в надплунжерном пространстве начинается раньше, чем плунжер осуществит перекрытие впускного отверстия втулки. Изменение технического состояния элементов линии нагнетания ведет к изменению количества топлива, которое подается форсункой. Таким образом, коэффициент по-

дачи по секциям характеризует идентичность их работы.

В реальных условиях эксплуатации перегрузка отдельных цилиндров ведет к снижению топливной экономичности на 19...15 %, увеличению дымности отработавших газов. В момент достижения пика давления сгорания наблюдается снижение производительности масляного насоса на 23 %, нарушается процесс отчистки масла центрифугой и повышается его загрязненность продуктами износа.

При соблюдении условия неизменности комплектующих элементов величина цикловой подачи топлива является определяющей для всех остальных параметров процесса впрыска, являющихся ее производными. Для большинства дизелей цикловая подача топлива на режимах холодного пуска составляет 100...150 мг/цикл на литр рабочего объема цилиндра. В неустановившихся режимах двигателя изменяются дозировка и фазы топливоотдачи: в некоторых из них уменьшение цикловой подачи топлива составляет 20...40 %.

На показатели работы дизеля в неустановившихся режимах существенно влияет быстродействие регулятора, увеличение которого улучшает динамику двигателя. Увеличением цикловой подачи топлива можно обеспечить сокращение времени пуска [13; 14].

Таким образом, для того чтобы обеспечить качественный процесс сгорания топлива, перед топливной системой дизельного двигателя стоит задача обеспечения гарантированного впрыскивания дозированной цикловой подачи топлива с учетом заданных фаз и характеристик впрыска, что будет благоприятно сказываться на процессе сгорания топлива на любых режимах эксплуатации дизельного двигателя.

Как увеличение, так и уменьшение угла опережения впрыскивания топлива от оптимального его значения увеличивает продолжительность пуска дизеля. Однако уменьшение угла опережения впрыскивания, по сравнению с оптимальным, увеличивает время пуска более резко, что объясняется воспламенением топлива на такте расширения.

Отклонения параметров топливоподачи от их оптимальных значений в связи с износом прецизионных элементов топливного насоса высокого давления оказывают существенное влияние на мощностные и экономические показатели дизеля.

Учитывая изложенное, оптимизация характеристик топливоподачи дизельных двигателей является актуальной проблемой.

Цель исследования – установление оптимальных параметров, характеризующих топливоподачу в процессе эксплуатации топливной аппаратуры.

Материалы и методы. Процесс оптимизации параметров топливоподачи и показателей рабочего процесса дизельных двигателей осуществляется путем многофакторного математического моделирования [15–17]. При оптимизации используется методика многофакторного математического моделирования на базе метода узловых точек. Полиномиальные модели позволяют имитировать процесс работы топливного насоса высокого давления.

Результаты исследований и их обсуждение. Многофакторную математическую модель с учетом метода узловых точек можно записать следующим образом:

$$Y = \frac{1}{(Y_0)^{n-1}} \times \prod_{i=1}^n f(X_i),$$

где Y – параметр подачи топлива;

Y_0 – параметр подачи топлива в узловой точке;

n – количество факторов;

$f(X_i)$ – однофакторная зависимость.

Гидродинамический расчет подачи топлива позволил выделить факторы, определяющие характеристики процесса впрыска и качественные показатели, характеризующие течение рабочего процесса в дизельном двигателе: цикловая подача топлива (q_c), давление впрыска (P_B), угол запаздывания впрыска (φ_Z), длительность впрыска (φ_P). Также установлено, что идентичность гидравлических характеристик определяется в основном зазорами в плунжерной паре (δ_P) и по разгружающему пояску нагнетательного клапана (δ_K), эффективным проходным сечением топливопровода высокого давления ($\mu_T f_T$), эффективным проходным сечением распылителя форсунки ($\mu_P f_P$).

Известно, что характеристика впрыска (X_B) и качество распыла топлива определяются цикловой подачей, давлением и длительностью впрыска топлива [18–20].

На рисунке приведена схема ориентированного графа, который характеризует разработанные многофакторные математические модели, учитывающие влияние выделенных факторов.

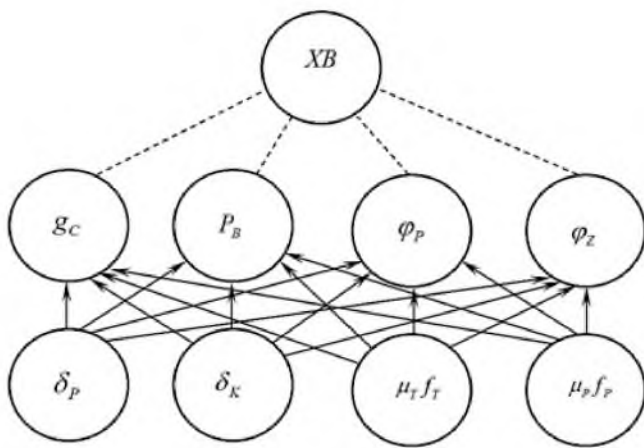


Рисунок – Схема ориентированного графа
Figure – Diagram of a directed graph

На основании выражения (1) и принятого ориентированного графа получим:

$$g_C = \frac{1}{(g_{C_0})^3} (\delta_P) g_C (\delta_K) g_C (\mu_T f_T) g_C (\mu_P f_P) g_C; \quad (2)$$

$$\varphi_P = \frac{1}{(\varphi_{P_0})^3} (\delta_P) \varphi_P (\delta_K) \varphi_P (\mu_T f_T) \varphi_P (\mu_P f_P) \varphi_P; \quad (3)$$

$$P_B = \frac{1}{(P_{B_0})^3} (\delta_P) P_B (\delta_K) P_B (\mu_T f_T) P_B (\mu_P f_P) P_B; \quad (4)$$

$$\varphi_Z = \frac{1}{(\varphi_{Z_0})^3} (\delta_P) \varphi_Z (\delta_K) \varphi_Z (\mu_T f_T) \varphi_Z (\mu_P f_P) \varphi_Z; \quad (5)$$

где $g_{C_0}, \varphi_{P_0}, P_{B_0}, \varphi_{Z_0}$ – параметры подачи топлива в узловой точке;

$$(\delta_P) g_C, (\delta_K) g_C, (\mu_T f_T) g_C, (\mu_P f_P) g_C,$$

$$(\delta_P) \varphi_P, (\delta_K) \varphi_P, (\mu_T f_T) \varphi_P, (\mu_P f_P) \varphi_P,$$

$$(\delta_P) P_B, (\delta_K) P_B, (\mu_T f_T) P_B, (\mu_P f_P) P_B,$$

$(\delta_P) \varphi_Z, (\delta_K) \varphi_Z, (\mu_T f_T) \varphi_Z, (\mu_P f_P) \varphi_Z$ – функции факторов, оказывающих влияние на величины ЦПТ, продолжительности, давления и угла запаздывания впрыска топлива.

Аппроксимация однофакторных зависимостей параметров подачи топлива от показателей, определяющих техническое состояние топливной системы высокого давления, произведена с использованием следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_P &= 8,514 + 0,086 \delta_P \\ \varphi_Z &= 10,223 + 0,0000345 e^{0,971 \delta_P} \\ g_C &= 77,405 - 0,531 \delta_P \\ P_B &= 24,979 - 0,535 \delta_P \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_P &= 11,882 - 0,284 \delta_K \\ \varphi_Z &= 10,284 + 10,56 e^{0,602 \delta_K} \\ g_C &= 770,607 + 0,307 \delta_K \\ P_B &= 19,205 + 0,258 \delta_K \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_P &= 12,582 - 3,786 \mu_T f_T \\ \varphi_Z &= \text{const} \\ g_C &= 71,959 + 2,607 \mu_T f_T \\ P_B &= 33,293 - 122,143 \mu_T f_T \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_P &= 12,098 - 6,964 \mu_P f_P \\ \varphi_Z &= 10,139 + 692,552 e^{-22,702 \mu_P f_P} \\ g_C &= -10582,544 + 1065 (1 - e)^{-26,447 \mu_P f_P} \\ P_B &= 29,629 - 17,429 \mu_P f_P \end{aligned} \right\}; \quad (9)$$

В результате совместного решения уравнений (6–9) и (2–5) получены нижеследующие математические модели (для УТН-5):

$$g_C = \frac{1}{(75)^3} (77,405 - 0,531 \delta_P) (70,607 + 0,375 \delta_K) \times \\ \times (71,959 + 2,607 \mu_T f_T) (-10582,544 + 1065 [1 - e^{-26,447 \mu_P f_P}]); \quad (10)$$

$$\varphi_P = \frac{1}{(9)^3} (8,514 + 0,086 \delta_P) (11,862 - 0,284 \delta_K) \times \\ \times (12,582 - 3,786 \mu_T f_T) (12,098 - 6,964 \mu_P f_P); \quad (11)$$

$$P_B = \frac{1}{(22)^3} (24,979 - 0,535 \delta_P) (19,205 + 0,258 \delta_K) \times \\ \times (33,293582 - 122,143 \mu_T f_T) (29,629 - 17,429 \mu_P f_P); \quad (12)$$

$$\varphi_Z = \frac{1}{(10,5)^3} (10,223 + 0,000034 e^{0,971 \delta_P}) (10,284 + 10,56 e^{0,602 \delta_K}) \times \\ \times (10,5) (10,139 + 692,552 e^{-22,702 \mu_P f_P}); \quad (13)$$

Расчеты показывают, что с увеличением $\mu_P f_P$ с 0,33 до 0,6 мм² цикловая подача топлива возрастает на 2,0 мм³/цикл (на 2,7 %). Цикловая подача топлива возрастает до критического значения $\mu_P f_P$, и в дальнейшем рост существен-

но не сказывается на ее значении. Критическое значение μ_{P_f} определяется соотношением q_c и μ_{T_f} . Учитывая это, μ_{P_f} стендовой форсунки для исследованной ТА равна $0,45 \pm 0,02$ мм², а $\mu_{T_f} = 0,95 \pm 0,05$ мм². Следует отметить, что при этом изменение характеристик топливоподачи $g_{C_0}, \varphi_{P_0}, P_{B_0}, \varphi_{Z_0}$ с изменением μ_{P_f} и μ_{T_f} будет наименьшим.

С увеличением зазора по разгружающему пояску нагнетательного клапана с 4,0 до 10 мкм цикловая подача топлива увеличивается на 3,0 мм³ цикл (на 4%). Однако увеличение цикловой подачи топлива от увеличения δ_K не равноценно увеличению цикловой подачи топлива от увеличения μ_{P_f} ввиду увеличения давления впрыска на 11,1 % (в первом случае) и уменьшения на 8,18% (во втором случае). Соответственно, имеет место уменьшение продолжительности впрыска φ_P на $1,8...^0$ (на 20 %) и на $1...^0$ (на 9 %).

При подборе форсунок и топливопроводов по такому критерию, как пропускная способность, указанные обстоятельства обычно не учитываются, следствием чего является неравномерность по φ_P и P_B при идентичности значений цикловой подачи топлива по секциям топливного насоса высокого давления и комплектам топливной аппаратуры. В конечном итоге рабочий процесс в различных цилиндрах дизельного двигателя протекает не идентично.

Используя полученные многофакторные математические модели параметров подачи топлива (10)–(13), возможно обоснование параметров стендовых форсунок и топливопроводящей системы, установление значений элементов топливной системы высокого давления, которые обеспечат равномерную цикловую подачу топлива с учетом $\varphi_P, P_B, \varphi_Z$.

В результате оптимизации целевые функции получены в виде уравнения регрессии:

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3, \quad (14)$$

где Y – исследуемый показатель;

X_1, X_2, X_3 – факторы;

B_0, B_1, B_2, B_3 – коэффициенты регрессии.

Для различных показателей работы дизельного двигателя уравнение (14) запишутся в виде:

- индикаторный КПД:

$$\eta_i = 0,593 + 0,000438 \varphi_Z - 0,00263 \varphi_P - 2,226 g_C; \quad (15)$$

- индикаторный удельный расход топлива:

$$g_i = 114,89 - 0,223 \varphi_Z + 1,34 \varphi_P + 1116,76 g_C; \quad (16)$$

- индикаторная мощность:

$$N_i = 8,33 + 0,019 \varphi_Z - 0,12 \varphi_P + 216,92 g_C; \quad (17)$$

- максимальное давление газов:

$$P_Z = 3,078 + 0,116 \varphi_Z - 0,0428 \varphi_P + 37,988 g_C; \quad (18)$$

- жесткость работы дизельного двигателя:

$$\frac{\Delta P}{\Delta \alpha} = 0,227 + 0,0198 \varphi_Z - 0,000285 \varphi_P + 8,032 g_C; \quad (19)$$

- среднее индикаторное давление рабочего цикла:

$$P_i = 0,386 + 0,00813 \varphi_Z - 0,00556 \varphi_P + 9,939 g_C; \quad (20)$$

- максимальная температура газов:

$$T_Z = 31413,208 + 6,531 \varphi_Z - 22,844 \varphi_P + 111417,683 g_C. \quad (21)$$

Индикаторный КПД η_i дизеля – это интегральный критерий эффективности тепловыделения, который зависит от параметров топливоподачи. Учитывая это, данный показатель принят в качестве критерия оптимизации.

С использованием уравнений (15–21) рассчитаны индикаторные показатели дизеля 4С11/12,5. Расчеты показали, что на значение η_i оказывают заметное влияние величина и длительность подачи топлива, определяющих вместе со значением угла начала впрыска топлива качественные показатели тепловыделения. При увеличении цикловой подачи топлива от 0,05 до 0,065 г/цикл происходит уменьшение η_i с 0,438 до 0,400, т. е. на 0,038 (на 8,68 %). При увеличении φ_P с 20 до $28...^0$ имеет место уменьшение η_i с 0,400 до 0,382, т. е. на 0,018 (на 4,5 %). При отклонении φ_P от первоначального значения $26...^0$ на $\pm 4,0...^0$ установлено уменьшение влияния на η_i . При $g_C = 0,05$ г/цикл и $\varphi_P = 20...^0$ величина отклонения η_i оказалась равной 0,001...0,002 (0,25...0,50 %), а при $g_C = 0,068$ г/цикл и $\varphi_P = 20...^0$ – 0,001 (0,25 %) [21]. В случае, когда одновременно увеличиваются продолжительность

впрыска и φ_p , установлено незначительное изменение η_i (на 0,002 или на 0,5 %).

Отличие значения η_i , установленных с использованием предлагаемых моделей и расчетным путем, для дизельного двигателя 4Ч11/12,5 составило 0,5%, что подтверждает адекватность разработанных моделей.

Поиск экстремума целевой функции $\eta_i = f(\varphi_p, \varphi_z, g_c)$ показал, что значение экстремума ($\eta_i = 0,440$) имеет место при $\varphi_z = 24,96...^\circ$,

$\varphi_p = 20...^\circ$, $q_c = 0,0507$ г/цикл. Следовательно, указанные величины можно считать оптимальными для дизельного двигателя 4Ч11/12,5. В этом случае индикаторными показателями указанного дизеля являются: $N_i = 17,41$ кВт, $g_i = 192,8$ г/кВт·ч, $P_z = 0,8$ МПа.

Заключение. С использованием полученных многофакторных математических моделей параметров топливоподачи возможно обоснование параметров стендовых форсунок и топливопроводов, установление значений элементов топливной системы высокого давления, которые обеспечат равномерную цикловую подачу топлива с учетом $\varphi_p, P_z, \varphi_z$.

Установлено, что значение экстремума критерия оптимизации (индикаторный КПД) для дизельного двигателя 4Ч11/12,5 имеет место при угле запаздывания впрыска $24,96...^\circ$, длительности впрыска $20...^\circ$, цикловой подаче топлива $0,0507$ г/цикл. При этом индикаторная мощность указанного двигателя $17,41$ кВт, индикаторный удельный расход топлива $192,8$ г/кВт·ч, максимальное давление газов $0,8$ МПа.

Результаты исследования показывают, что параметры топливоподачи в основном определяют техническим состоянием распылителя форсунки и нагнетательного клапана, а также давлением впрыскивания и цикловой подачей топлива.

Список источников

1. Исследование влияния технического состояния элементов топливной системы высокого давления на параметры топливоподачи / А.К. Апажев [и др.] // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2024. № 3 (45). С. 83-92. DOI: 10.55196/2411-3492-2024-3-45-83-92. EDN: GVCXBU.

2. Уханов Д.А., Маньшев Д.А., Уханов А.П. Оценка дизельных топлив по комплексному показателю жесткости процесса сгорания в поршневом двигателе // Нива Поволжья. 2024. № 1 (69). DOI: 10.36461/NP.2024.69.1.002. EDN: LMSIGK.

3. Improving the reliability of machine and tractor units in technological processes / P.A. Lebedev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. P. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/996/1/012004. EDN: GFLAIK.

4. Лебедев А.Т., Серегин А.А., Арженовский А.Г. Совершенствования методов оперативного управления надежностью технических систем в АПК // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 1. С. 71-76. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-1-71-76. EDN: YHBEОВ.

5. Севрюгина Н.С., Арженовский А.Г., Апатенко А.С. Предотвращение отказов двигателя внутреннего сгорания путем включения цифрового аналитического модуля глубокого обучения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2025. № 3. С. 101-107. DOI: 10.31857/S0235711925030136. EDN: GNTGSP.

6. Батыров В.И., Шекихачев Ю.А., Губжоков Х.Л. Анализ причин нестабильности параметров топливоподачи тракторных дизелей // Актуальные научные исследования: от теории к практике: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. Кишинев, Молдавия: Научно-издательский центр «Мир науки», 2017. С. 44-47. EDN: XWLRXR.

7. Вероятностный анализ показателей надежности насосов с помощью нейронной сети / Я.А. Тынченко [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 7-1. С. 126-136. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_126. EDN: DBWHXZ.

8. Methodology for Assessing the Efficiency of Measures for the Operational Management of the Technical Systems' Reliability / A.T. Lebedev [et al.] // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021»: Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. 2022. Vol. 1. P. 13-20. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_2. EDN: BTVEYT.

9. Исследование влияния неравномерности подачи топлива на показатели работы дизельного двигателя / Ю.А. Шекихачев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2019. № 5 (263). С. 18-21. DOI: 10.33267/2072-9642-2019-5-18-21. EDN: UCNHVM.

10. Operational Management of Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex / A.T. Lebedev [et al.] // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH

2021»: Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. 2022. Vol. 1. P. 79-87. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_9. EDN: VAMVQW.

11. Арженовский А.Г., Севрюгина Н.С., Апатенко А.С. Безразборный метод формирования банка данных о техническом состоянии топливной системы ДВС технологических машин в режиме реального времени // Тракторы и сельхозмашины. 2025. С. 1-16. DOI: 10.17816/0321-4443-634830. EDN: GTGRPX.

12. Исследование режимов работы дизельных двигателей тракторов в реальных условиях эксплуатации / Ю.А. Шекихачев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2019. № 4 (262). С. 14-19. DOI: 10.33267/2072-9642-2019-4-14-19. EDN: IRSNXN.

13. Работоспособность форсунки дизельного двигателя д-243 при добавлении в топливо биодобавок растительного происхождения / А.С. Апатенко [и др.] // Технический сервис машин. 2026. Т. 64. № 1. С. 74-79. DOI: 10.22314/2618-8287-2026-64-1-74-79. EDN: JWWWMF.

14. Improving the fuel efficiency of an agricultural tractor diesel engine / A. Bolotkov [et al.] // VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023). 2023. Vol. 411. P. 01045. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101045. EDN: OPFCLW.

15. Припоров И.Е. Применение теории графов в системе питания дизельного автотракторного двигателя // Аграрный научный журнал. 2023. № 3. С. 136-139. DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp136-139. EDN: ABLPXZ.

16. Болотоков А.Л., Трояновская И.П., Войнаш С.А. Сравнительные испытания форсунок дизелей с серийными и модернизированными распылителями // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91. № 2. С. 243-250. DOI: 10.17816/0321-4443-622766. EDN: IUOZXX.

17. Болотоков А.Л., Губжиков Х.Л. Исследование параметров технического состояния распылителей дизельных форсунок // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2024. № 3 (45). С. 93-99. DOI: 10.55196/2411-3492-2024-3-45-93-99. EDN: VPELWT.

18. Improving the performance of tractor diesel engines by optimizing the fuel supply characteristics / A.K. Apazhev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. P. 42084. DOI: 10.1088/1755-1315/677/4/042084. EDN: ADOSXI.

19. Influence of fractional composition of fuel on engine performance / A.K. Apazhev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and

Environmental Science. 2021. Vol. 677. P. 42086. DOI: 10.1088/1755-1315/677/4/042086. EDN: NRJYFX.

20. Investigation of coking diesel injector spray nozzles in operation / A. Apazhev [et al.] // Innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems (ITEEA 2021): E3S Web of Conferences 1st International Scientific and Practical Conference. 2021. Vol. 262. P. 01020. DOI: 10.1051/e3sconf/202126201020. EDN: VSXIQ.

21. Батыров В.И. Оптимизация параметров топливоподачи с учетом характера протекания рабочего процесса дизелей сельскохозяйственного назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Нальчик, 2003. 124 с. EDN: NMHGKV.

References

Apazhev A.K. [et al.] Issledovanie vliyaniya tekhnicheskogo sostoyaniya ehlementov toplivnoi sistemy vysokogo davleniya na parametry toplivopodachi [Study of the influence of the technical condition of the high-pressure fuel system elements on the fuel supply parameters]. Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova. 2024; 3(45): 83-92. DOI: 10.55196/2411-3492-2024-3-45-83-92. EDN: GVCXBU. (In Russ).

2. Ukhanov D.A., Manshev D.A., Ukhanov A.P. Otsenka dizel'nykh topliv po kompleksnomu pokazatelyu zhestkosti protsessa sgoraniya v porshnevom dvigatele [Evaluation of diesel fuels based on the complex index of combustion severity in a piston engine]. Volga Region Farmland. 2024; 1(69). DOI: 10.36461/NP.2024.69.1.002. EDN: LMSIGK. (In Russ).

3. Lebedev P.A. [et al.] Improving the reliability of machine and tractor units in technological processes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022: 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/996/1/012004. EDN: GFLAIK.

4. Lebedev A.T., Seregin A.A., Arzhenovsky A.G. Sovershenstvovaniya metodov operativnogo upravleniya nadezhnost'yu tekhnicheskikh sistem v APK [Improving methods of operational management of technical systems reliability in the agro-industrial complex]. Tractors and agricultural machinery. 2020; (1): 71-76. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-1-71-76. EDN: YHBEOB. (In Russ).

5. Sevryugina N.S., Arzhenovsky A.G., Apatenko A.S. Predotvrashchenie otkazov dvigatelya vnutrennego sgoraniya putem vklyucheniya tsifrovogo analiticheskogo modulya glubokogo obucheniya [Preventing internal combustion engine failures by incorporating a deep learning

digital analytics module]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2025; (3): 101-107. DOI: 10.31857/S0235711925030136. EDN: GNTGSP. (In Russ).

6. Batyrov V.I., Shekikhachev Yu.A., Gubzhokov Kh.L. Analiz prichin nestabil'nosti parametrov toplivopodachi traktornykh dizelei [Analysis of the causes of instability of fuel supply parameters of tractor diesel engines]. Proceedings of the International (Distance) Scientific and Practical Conference: «Current Scientific Research: From Theory to Practice». Chisinau, Moldova: Nauchno-izdatel'skii tsentr «Mir nauki»; 2017: 44-47. EDN: XWLRXR. (In Russ).

7. Tynchenko Ya.A. [et al.] Veroyatnostnyi analiz pokazatelei nadezhnosti nasosov s pomoshch'yu neironnoi seti [Probabilistic analysis of pump reliability indicators using a neural network]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2024; (7-1): 126-136. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_126. EDN: DBWHXZ. (In Russ).

8. Lebedev A.T. [et al.] Methodology for Assessing the Efficiency of Measures for the Operational Management of the Technical Systems' Reliability. *XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021»: Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*. 2022; (1): 13-20. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_2. EDN: BTVEYT.

9. Shekikhachev Yu.A. [et al.] Issledovanie vliyaniya neravnomernosti podachi topliva na pokazateli raboty dizel'nogo dvigatelya [A study of the influence of uneven fuel supply on the performance of a diesel engine]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019; 5(263): 18-21. DOI: 10.33267/2072-9642-2019-5-18-21. EDN: UCNHVM. (In Russ).

10. Lebedev A.T. [et al.] Operational Management of Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex. *XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021»: Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*. 2022; (1): 79-87. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_9. EDN: VAMVQW.

11. Arzhenovsky A.G., Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Bezrazbornyi metod formirovaniya banka dannykh o tekhnicheskoy sostoyanii toplivnoi sistemy DVS tekhnologicheskikh mashin v rezhime real'nogo vremeni [A non-disassemblable method for creating a database of the technical condition of the fuel system of internal combustion engines of technological machines in real time]. *Tractors and agricultural machinery*. 2025; 1-16. DOI: 10.17816/0321-4443-634830. EDN: GTGRPX. (In Russ).

12. Shekikhachev Yu.A. [et al.] Issledovanie rezhimov raboty dizel'nykh dvigatelei traktorov v real'nykh usloviyakh ehkspluatatsii [Study of

operating modes of diesel engines of tractors under real operating conditions]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019; 4(262): 14-19. DOI: 10.33267/2072-9642-2019-4-14-19. EDN: IRSNXN. (In Russ).

13. Apatenko A.S. [et al.] Rabotosposobnost' forsunki dizel'nogo dvigatelya d-243 pri dobavlenii v toplivo biodobavok rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Performance of the D-243 diesel engine injector when adding plant-based bioadditives to the fuel]. *Machinery Technical Service*. 2026; 64(1): 74-79. DOI: 10.22314/2618-8287-2026-64-1-74-79. EDN: JWWWMF. (In Russ).

14. Bolotokov A. [et al.] Improving the fuel efficiency of an agricultural tractor diesel engine. *VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023)*. 2023; (411): 01045. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101045. EDN: OPFCLW.

15. Priporov I.E. Primenenie teorii grafov v sisteme pitaniya dizel'nogo avtotraktornogo dvigatelya [Application of graph theory to the fuel system of a diesel automotive engine]. *The Agrarian Scientific Journal*. 2023; (3): 136-139. DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp136-139. EDN: ABLPXZ. (In Russ).

16. Bolotokov A.L., Troyanovskaya I.P., Voynash S.A. Sravnitel'nye ispytaniya forsunok dizelei s seriinymi i modernizirovannymi raspylitelyami [Comparative tests of diesel injectors with standard and upgraded nozzles]. *Tractors and agricultural machinery*. 2024; 91(2): 243-250. DOI: 10.17816/0321-4443-622766. EDN: IUOZXX. (In Russ).

17. Bolotokov A.L., Gubzhokov Kh.L. Issledovanie parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya raspylitelei dizel'nykh forsunok [Study of the technical condition parameters of diesel injector nozzles]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova*. 2024; 3(45): 93-99. DOI: 10.55196/2411-3492-2024-3-45-93-99. EDN: VPELWT. (In Russ).

18. Apazhev A.K. [et al.] Improving the performance of tractor diesel engines by optimizing the fuel supply characteristics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 42084. DOI: 10.1088/1755-1315/677/4/042084. EDN: ADOSXI.

19. Apazhev A.K. [et al.] Influence of fractional composition of fuel on engine performance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; (677): 42086. DOI: 10.1088/1755-1315/677/4/042086. EDN: NRJYFX.

20. Apazhev A. [et al.] Investigation of coking diesel injector spray nozzles in operation. *Innovative*

Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems (ITEEA 2021): E3S Web of Conferences 1st International Scientific and Practical Conference. 2021; (262): 01020. DOI: 10.1051/e3sconf/202126201020. EDN: VSOXIQ.

21. Batyrov V.I. Optimizatsiya parametrov toplivopodachi s uchetom kharaktera protskaniya rabochego protsessa dizelei sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya [Optimization of fuel supply parameters taking into account the nature of the operating process of agricultural diesel engines][Dissertation]. Nalchik; 2003: 124. EDN: NMHGKV. (In Russ).

ВКЛАД АВТОРОВ

Шекихачев Ю.А. – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулировка цели исследования и выводов.

Балкаров Р.А. – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор данных; создание многофакторной математической модели.

Фиापшев А.Г. – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор данных; анализ существующих методов оптимизации параметров топливopодачи и показателей рабочего процесса дизельных двигателей.

Шекихачева Л.З. – разработка или проектирование методологии исследования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Апхудов Т.М. – исследования в рамках основных или дополнительных задач работы; аппроксимация однофакторных зависимостей параметров подачи топлива от показателей, определяющих техническое состояние топливной системы высокого давления.

AUTHOR CONTRIBUTION

Shekikhachev, Yu.A. – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting research; formulation of research objectives and conclusions.

Balkarov, R.A. – implementation of the research process, including experiments, data collection; creation of a multifactorial mathematical model.

Fiapshv, A.G. – implementation of the research process, including experiments, data collection; analysis of existing methods for optimizing fuel supply parameters and diesel engine operation indicators.

Shekikhacheva, L.Z. – development or design of research methodology; creation and preparation of the manuscript: visualization of the research results and data obtained.

Apkhudov, T.M. – research within the framework of the main or additional work tasks; approximation of one-factor dependencies of fuel supply parameters on indicators determining the technical condition of the high-pressure fuel system.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТАВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

There are no human or animal studies in the work.

Информация об авторах

Ю.А. Шекихачев – доктор технических наук, профессор; AuthorID 480039.

Р.А. Балкаров – доктор технических наук, профессор; AuthorID 268189.

А.Г. Фиапшев – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 461209.

Л.З. Шекихачева – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; AuthorID 480041.

Т.М. Апхудов – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 261675.

Information about the author

Yu. A. Shekikhachev – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 480039.

R. A. Balkarov – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 268189.

A. G. Fiapshv – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 461209.

L. Z. Shekikhacheva – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor; AuthorID 480041.

T. M. Apkhudov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 261675.

Статья поступила в редакцию 14.04.2026; одобрена после рецензирования 20.05.2026; принята к публикации 18.06.2026.

The article was submitted 14.04.2026; approved after reviewing 20.05.2026; accepted for publication 18.06.2026.