

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДАЧИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

П. Ю. МАЛЫШКИН

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции  
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: pavelm36@yandex.by

(Поступила в редакцию 11.11. 2022)

В статье приведены результаты теоретических исследований по оптимизации подачи газового топлива и определения наилучших скоростных и нагрузочных режимов работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (D-245.5S2), при работе с добавкой сжиженного нефтяного газа марки ПБА во впускной коллектор, обеспечивающих, максимальный эффективный коэффициент полезного действия, наибольшую экономию дизельного топлива, при наименьшей дымности отработавших газов. Получены уточнённые математические уравнения регрессии второго порядка путем реализации плана эксперимента Бокса-Бенкина. Результаты эксперимента обрабатывались при помощи пакета прикладных программ по статистической обработке данных «Statgraphics 18» и «Microsoft Excel». При этом полученные модели регрессии оценивались на адекватность реальному процессу с помощью F-критерия Фишера с вероятностью  $P = 0,95$ , а значимость коэффициентов регрессии оценивали t-критерием Стьюдента.

Полученные зависимости легли в основу комплексной оптимизации по критерию D-optimum, позволяющего эмпирически определить алгоритм регулирования подачи газа для дизеля и графически интерпретировать контуры расчетной поверхности отклика.

Анализ полученных моделей позволил определить оптимальную подачу газового топлива во впускной коллектор дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (D-245.5S2), в количестве 20...30 % от дизельного топлива в области эффективной нагрузки дизеля 0,8...1,0 МПа и частотах вращения 1400...1750 мин<sup>-1</sup>, а при эффективной нагрузке дизеля 0,7...0,80 МПа подачу газового топлива наиболее целесообразно обеспечивать в количестве 12...20 % от дизельного топлива при частотах вращения 1400...1700 мин<sup>-1</sup>.

**Ключевые слова:** дизель, газовое топливо, планирование эксперимента, факторы и уровни варьирования, регрессионный анализ, поверхность отклика.

The article presents the results of theoretical studies on optimizing the supply of gas fuel and determining the best speed and load modes of operation of the diesel engine 4CN 11.0/12.5 (D-245.5S2), when working with the addition of PBA liquefied petroleum gas to the intake manifold, providing the maximum effective efficiency, the greatest savings in diesel fuel, with the least smoke content of exhaust gases. Refined mathematical equations of second-order regression were obtained by implementing the plan of the Box-Benkin experiment. The results of the experiment were processed using a package of statistical data processing applications "Statgraphics 18" and "Microsoft Excel." At the same time, the obtained regression models were evaluated for adequacy to the real process using Fisher's F-test with probability  $P = 0.95$ , and the significance of the regression coefficients was assessed by Student's t-test.

The obtained dependencies formed the basis of the complex optimization according to the D-optimum criterion, which allows empirically determining the algorithm for regulating the gas supply for the diesel engine and graphically interpreting the contours of the calculated response surface presented in the article.

Analysis of the obtained models made it possible to determine the optimal supply of gas fuel to the intake header of the diesel engine 4CN 11.0/12.5 (D-245.5S2), in the amount of 20... 30 % of diesel fuel in the area of the effective load of the diesel engine 0.8... 1.0 MPa and rotation frequencies 1400... 1750 min<sup>-1</sup>, and with an effective load of the diesel engine 0.7... 0.80 MPa, it is most advisable to provide gas fuel supply in the amount of 12... 20 % of diesel fuel at rotation frequencies 1400... 1700 min<sup>-1</sup>.

**Key words:** diesel engine, gas fuel, planning of an experiment, factors and levels of variation, regression analysis, response surface.

### Введение

Потребление дизельного топлива транспортными средствами в Республике Беларусь организациями всех видов экономической деятельности с 2010 года увеличилось более чем на 30 % с 972 до 1278 тыс. тонн. Одной из стратегических задач в сфере энергосбережения является снижение зависимости Республики Беларусь от импортируемых энергоресурсов за счет максимально возможного вовлечения в топливно-энергетический баланс страны собственных топливно-энергетических ресурсов [1]. При этом эксплуатация машинно-тракторного парка сельскохозяйственного предприятия, состоящего преимущественно из тракторов, автомобилей, комбайнов и других самоходных машин неизбежно связана с достаточно большими затратами, четвертая часть из которых используется для приобретения топлива. Применение альтернативных топлив, способных частично или полностью заменить традиционное топливо позволит снизить его потребление, а соответственно и затраты на эксплуатацию техники. В числе таких топлив в настоящее время исследуются газовые топлива (сжатые, сжиженные газы, биогаз). Широкая развитость инфраструктуры газонаполнительных станций в Республике Беларусь насчитывает более 300 заправок сжиженного нефтяного газа (марки ПБА) и 26 газонаполнительных станций компримированного природного газа (метана). Применение газового

топлива на сельскохозяйственном транспорте значительно уменьшит эксплуатационные затраты на топливо и в конечном счете снизит себестоимость выпускаемой продукции.

### Основная часть

При проведении исследования разработанной газовой системы питания [2] для тракторного дизеля возникает необходимость в рациональном использовании газового топлива, подаваемого в воздушный заряд дизеля на различных режимах работы. Поскольку проведение испытаний на всех эксплуатационных режимах с различным количеством подаваемого газового топлива весьма трудоемки, было реализовано планирование эксперимента. Анализ проведенных предварительных испытаний, изложенных в ранее опубликованных работах [3, 4], позволил определить границы варьирования факторов. Для исследований выбран: рабочий диапазон частот вращения коленчатого вала 1200...1800 мин<sup>-1</sup>, эффективная нагрузка дизеля 0,7...1,0 МПа, количество подаваемого газа 0...30 % от подачи дизельного топлива (ДТ) [3].

Для определения наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность процесса сгорания обоих (дизельного и газового) топлив, была проведена серия отсеивающих экспериментов, что позволило определить основные факторы, влияющие на рабочий процесс дизеля [4].

С целью оптимизации подачи газового топлива во впускной коллектор и определения наилучших скоростных и нагрузочных режимов работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2), обеспечивающих, максимальный эффективный коэффициент полезного действия (КПД), наибольшую экономию дизельного топлива при наименьшей дымности отработавших газов (ОГ), реализован план эксперимент Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов. Факторы и уровни варьирования приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1. Факторы и уровни варьирования при реализации плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов при определении оптимальных нагрузочных и скоростных режимах работы дизеля

Наименование фактора	Уровни факторов		
	(-1)	0	(+1)
Эффективная нагрузка дизеля $P_e$ , Па	$0,7 \cdot 10^6$	$0,85 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$
Частота вращения коленчатого вала $n$ , с <sup>-1</sup>	20	25	30
Содержание газа $G_r$ , доли	0	0,15	0,30

В качестве критериев оптимизации были приняты, соответственно: часовой расход ДТ  $G_{дт}$ , (0,0016...0,0039 кг/с); эффективный КПД  $\eta_e$  (0,3698...0,41), содержание сажи  $C$  (0,065...0,233) в ОГ дизеля.

Результаты эксперимента обрабатывались при помощи пакета прикладных программ по статистической обработке данных «Statgraphics 18» и «Microsoft Excel». При этом модели регрессии оценивали на адекватность реальному процессу с помощью  $F$ -критерия Фишера с вероятностью  $P = 0,95$ , значимость коэффициентов регрессии оценивали  $t$ -критерием Стьюдента [5, 6, 7].

После исключения незначимых членов из уравнения регрессии, а именно  $C^2$ ,  $P_e^2$ ,  $n \cdot C$ ,  $P_e \cdot n$ , получили уточнённое математическое уравнение (1) регрессии второго порядка для определения эффективного КПД дизеля:

$$\eta_e = 0,397129 + 0,0060875 \cdot P_e - 0,00395 \cdot n + 0,0052625 \cdot G_r + 0,006475 \cdot P_e \cdot G_r - 0,0122036 \cdot n^2. \quad (1)$$

Проверка соответствия полученной модели (1) опытными данным с помощью  $F$ -критерия Фишера с вероятностью  $P = 0,95$  показала, что модель адекватно описывает реальный процесс. Поскольку расчетные значения  $t$ -критерия Стьюдента превышают табличное при уровне значимости 0,05, то можно заключить, что выбранные факторы являются значимыми.

Анализ полученной модели показал, что максимальное значение  $\eta_e$  составляет 0,41 при значении  $P_e = 1,0 \cdot 10^6$  Па;  $G_r = 0,30$  и  $n = 24,2$  с<sup>-1</sup>.

После реализации плана эксперимента и исключения из уравнения незначимых членов из уравнения регрессии второго порядка, а именно  $P_e^2$ ,  $n^2$ , получили уточнённое математическое уравнение (2) регрессии второго порядка для определения наименьшего расхода дизельного топлива  $G_{дт}$  дизелем:

$$G_{дт} = 0,0025 + 0,0004125 \cdot P_e + 0,000625 \cdot n - 0,0004625 \cdot G_r + 0,0001 \cdot P_e \cdot n - 0,000075 \cdot P_e \cdot G_r - 0,0001 \cdot n \cdot G_r + 0,0001625 \cdot G_r^2. \quad (2)$$

Проверка соответствия полученной модели опытными данным с помощью  $F$ -критерия Фишера с вероятностью  $P = 0,95$  показала, что модель адекватно описывает реальный процесс. Значимость коэффициентов регрессии подтверждалась  $t$ -критерием Стьюдента.

Анализ полученной модели показал, что минимальное значение  $G_{дт}$  составляет 0,0014 кг/с, при значении  $P_e = 0,7 \cdot 10^6$  Па,  $G_r = 0,282$  и  $n = 20$  с<sup>-1</sup>.

После реализации плана эксперимента и исключения незначимых членов из уравнения регрессии второго порядка, а именно  $P_e^2$ ,  $n \cdot C$ ,  $P_e \cdot n$  получили уточнённое математическое уравнение (3) регрессии второго порядка для определения содержания сажи  $C$  в отработавших газах дизеля:

$$C = 0,101885 + 0,04725 \cdot P_e - 0,0123125 \cdot n - 0,0288125 \cdot G_r - 0,0235 \cdot P_e \cdot G_r + 0,0187019 \cdot n^2 + 0,0192019 \cdot G_r^2. \quad (3)$$

Проверка соответствия полученной модели опытным данным с помощью  $F$ -критерия Фишера с вероятностью  $P = 0,95$  показала, что модель адекватно описывает реальный процесс. Значимость коэффициентов регрессии подтверждалась  $t$ -критерием Стьюдента.

Анализ объёмной поверхности отклика показал, что минимальное значение содержания сажи  $C$  в ОГ дизеля составляет 0,052 при значении  $P_e = 0,7 \cdot 10^6$  Па,  $G_r = 0,171$  и  $n = 26,6$  с<sup>-1</sup>.

Далее, проводя комплексную оптимизацию по критерию  $D\text{-optium} \rightarrow 1,0$  с учетом выше полученных зависимостей (1...3)

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_e = 0,397129 + 0,0060875 \cdot P_e - 0,00395 \cdot n + 0,0052625 \cdot C + 0,006475 \cdot P_e \cdot C - 0,0122036 \cdot n^2 \\ G_{дт} = 0,0025 + 0,0004 \cdot P_e + 0,00062 \cdot n - 0,00046 \cdot G_r + 0,0001 \cdot P_e \cdot n - 0,000075 \cdot P_e \cdot G_r - 0,0001 \cdot n \cdot G_r + 0,00016 \cdot G_r^2 \\ C = 0,101885 + 0,04725 \cdot P_e - 0,0123125 \cdot n - 0,0288125 \cdot G_r - 0,0235 \cdot P_e \cdot G_r + 0,0187019 \cdot n^2 + 0,0192019 \cdot G_r^2 \end{array} \right\},$$

при условии

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_e \rightarrow \max \\ G_{дт} \rightarrow \min \\ C \rightarrow \min \end{array} \right\} \quad (4)$$

Графическая интерпретация контуров полученной по расчетной поверхности отклика представлена на рис. 1.

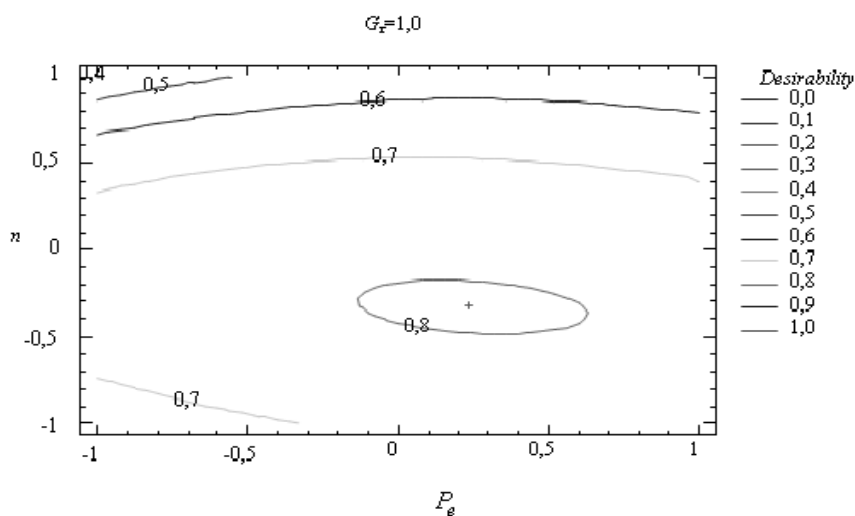


Рис. 1. Графическая интерпретация контуров расчетной поверхности отклика

В результате получено максимальное значение  $D\text{-optium} = 0,8$  при  $P_e = 0,88 \cdot 10^6$  Па,  $n = 23,4$  с<sup>-1</sup>,  $G_r = 0,30$ .

При помощи реализации зависимости общего критерия  $D\text{-optium}$  от  $P_e$ ,  $n$  и  $G_r$  можно эмпирически определить алгоритм регулирования подачи газа для дизеля. Для этого был реализован план эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов  $\eta_e$ ,  $G_{дт}$ ,  $C$ . Факторы и уровни варьирования которого приведены в табл. 2

Таблица 2. Факторы и уровни варьирования при реализации плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов при определении регулирования подачи газа

Наименование фактора	Уровни факторов		
	(-1)	0	(+1)
Эффективный КПД $\eta_e$	0,3698	0,3904	0,411
Часовой расход ДТ $G_{дт}$	0,0016	0,00275	0,0039
Содержание сажи $C$ в ОГ	0,065	0,149	0,233

Составлена матрица плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов и значения критерия  $D-optium$ , которая приведена в табл. 3.

Таблица 3. Матрица плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов и значения критерия  $D-optium$

№ п/п	$\eta_e$	$G_{дт}$	$C$	$D-optium$
1	0,0	0,0	0,0	0,984517
2	-1,0	-1,0	0,0	0,787547
3	1,0	-1,0	0,0	0,910924
4	-1,0	1,0	0,0	0,93372
5	1,0	1,0	0,0	0,796247
6	-1,0	0,0	-1,0	0,954229
7	1,0	0,0	-1,0	0,894832
8	0,0	0,0	0,0	0,984517
9	-1,0	0,0	1,0	0,876407
10	1,0	0,0	1,0	0,780844
11	0,0	-1,0	-1,0	0,976095
12	0,0	1,0	-1,0	0,785157
13	0,0	-1,0	1,0	0,816138
14	0,0	1,0	1,0	0,951148
15	0,0	0,0	0,0	0,984517

После реализации плана эксперимента и исключения незначимых членов из уравнения регрессии второго порядка получили математическое уравнение (5) регрессии второго порядка для определения уравнения регулирования подачи газа и значения критерия  $D-optium$

$$D-optium = 0,959005 - 0,063293 \cdot \eta_e^2 - 0,0652125 \cdot \eta_e \cdot G_{дт} - 0,0577365 \cdot G_{дт}^2 + 0,081487 \cdot G_{дт} \cdot C. \quad (5)$$

Проверка соответствия полученной модели опытным данным с помощью  $F$ -критерия Фишера, с вероятностью  $P = 0,95$ , показала, что модель адекватно описывает реальный процесс. Значимость коэффициентов регрессии подтверждалась  $t$ -критерием Стьюдента.

Графическая интерпретация уравнения (5) регулирования подачи газа и значения критерия  $D-optium$  представлена на рис. 2.

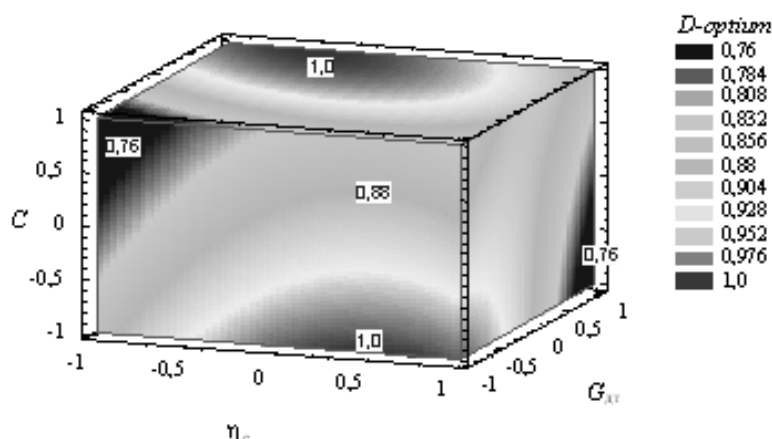


Рис. 2. Графическая интерпретация уравнения регулирования подачи газа и значения критерия  $D-optium$

На основании анализа полученных уравнений регрессии можно сказать, что наиболее оптимальный скоростной и нагрузочный режим работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2), при подаче газового топлива во впускной коллектор обеспечивается при  $P_e = 0,82 \dots 0,94 \cdot 10^6$  Па;  $n = 24 \dots 22,5$  с<sup>-1</sup> и  $G_T = 0,3$ .

### Заключение

Реализация плана эксперимента достаточно эффективно позволяет проводить анализ экспериментальных данных, а проверка значимости коэффициентов регрессии по  $t$ -критерию Стьюдента и полученных зависимостей  $F$ -критерию Фишера с вероятностью  $p = 0,95$  показала, что полученные модели адекватно описывают реальный процесс.

В результате проведенных исследований получены уточненное математическое уравнение регрессии второго порядка для определения эффективного КПД, расхода дизельного топлива и содержание сажи в отработавших газах дизеля в зависимости от эффективной нагрузки, подачи газа и частоты вращения коленчатого вала.

Анализ полученных моделей показал, что максимальные значения эффективного КПД дизеля достигается при эффективной нагрузке дизеля в диапазоне 0,8...1,0 МПа; подачи газового топлива 20...30 % от ДТ и частоте вращения коленчатого вала 1350...1750 мин<sup>-1</sup>, наименьшее потребление дизельного топлива двигателем, обеспечивается при эффективной нагрузке дизеля 0,7...0,85 МПа, подачи газового топлива 24,0...28,2 % от ДТ, и частоте вращения коленчатого вала 1200...1500 мин<sup>-1</sup> наименьшее содержание сажи в ОГ дизеля составляет при значении эффективной нагрузке дизеля 0,7...0,80 МПа, подачи газового топлива 12...20 % от ДТ и частоте вращения коленчатого 1400...1700 мин<sup>-1</sup>.

Таким образом, подачу газового топлива во впускной коллектор дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2), в количестве 20...30 % от ДТ наиболее целесообразно обеспечить в области эффективной нагрузки дизеля 0,8...1,0 МПа при частотах вращения 1400...1750 мин<sup>-1</sup>. При эффективной нагрузке дизеля 0,7...0,80 МПа подачу газового топлива наиболее целесообразно обеспечивать в количестве 12...20 % от ДТ при частотах вращения 1400...1700 мин<sup>-1</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 24 февр. 2021 г., № 103 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103>. – Дата доступа: 05.11.2022.
2. Электронная система впрыска газового топлива в дизель: пат. 10060 Респ. Беларусь, МПК F 02M 43/00 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, заявитель Белорус. гос. с-х. академия. № u 20130295; заявл. 05.04.2013; опубл.: 30.04.2014. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. № 2 – С. 150.
3. Карташевич, А. Н. Влияние подачи газового топлива на экологические показатели дизеля / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Вестн. БГСХА. – 2013. – № 3. – С. 110–115.
4. Исследования тракторного дизеля при подаче газа с использованием планирования эксперимента / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич, С. А. Плотников, М. В. Симонов // Вестн. БГСХА. – 2019. – № 2. – С. 239–243.
5. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
6. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов / Ю. П. Грачев. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 200 с.
7. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 310 с.