

УДК 621.436.001.24

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ПОДАЧЕ ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

П. Ю. МАЛЫШКИН, А. Н. КАРТАШЕВИЧ

*УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail:pavelm36@yandex.by*

С. А. ПЛОТНИКОВ, М. В. СИМОНОВ

*УО «Вятский государственный университет»,
г. Киров, Россия, 610002*

(Поступила в редакцию 05.02.2019)

Теоретические исследования и стендовые испытания дизеля Д-245.5S2 с подачей дизельного топлива и сжиженного газа, проведенные в аккредитованной лаборатории, выявили режимы, в которых подача газа целесообразна и способствует повышению эффективного коэффициента полезного действия исследуемого дизельного двигателя. Однако проведение испытаний на всех режимах тракторного двигателя и составах газового топлива связано с крупными материальными затратами и большим количеством опытов. Одним из лучших инструментов в исследованиях является реализация планирования эксперимента, позволяющего с доверительной вероятностью 95 % получать уравнения регрессии, описывающие исследуемые процессы при различном сочетании факторов с минимальными затратами.

В статье приведены результаты исследований тракторного двигателя при подаче газа с использованием планирования эксперимента. Получены регрессионные зависимости, отражающие влияние эффективного коэффициента полезного действия, часового расхода дизельного топлива, содержание частиц сажи в отработанных газах тракторного дизеля от эффективной нагрузки и подачи газа на номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя.

Представлены поверхности отклика, показывают влияние на критерии оптимизации факторов нагрузки дизеля и подачи газа при фиксированной номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя, при котором обеспечивается максимальный коэффициент полезного действия, минимальный расход дизельного топлива и содержание сажи в отработанных газах тракторного дизеля.

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

The theoretical researches and bench tests of the diesel D-245.5S2 with supply of diesel fuel and liquefied gas which are carried out in the accredited laboratory revealed the modes in which supply of gas is expedient and promotes increase in effective efficiency of the studied diesel engine. However carrying out tests on all modes of the tractor engine and compositions of gas fuel is connected with large material inputs and a large number of experiences. One of the best tools in researches is realization of planning of the experiment allowing with the confidential probability of 95% to receive the regression equations, describing the studied processes at various combination of factors to the minimum expenses.

Results of researches of the tractor engine at supply of gas with use of planning of an experiment are given in article. The regression dependences reflecting influence of effective efficiency, an hour consumption of diesel fuel, the maintenance of particles of soot in exhaust gases of the tractor diesel from effective loading and supply of gas at a nominal frequency of rotation of a bent shaft of the engine are received.

Response surfaces are presented, show influence on criteria of optimization of factors of loading of the diesel and supply of gas with the fixed nominal frequency of rotation of a bent shaft of the engine at which the maximum efficiency, minimum flow of diesel fuel and content of soot in exhaust gases of the tractor diesel is provided.

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

Введение

При проведении исследования разработанной газовой системы питания [1] на тракторном дизеле возникает необходимость в определении количества газового топлива, подаваемого в цилиндры дизеля на различных режимах работы. Поскольку проведение испытаний на всех допустимых режимах и составах газового топлива весьма трудоемки, в исследованиях было реализовано планирование эксперимента.

Анализ предварительных испытаний, изложенных в работах [2, 3], позволил определить границы варьирования факторов. Для частоты вращения принимаем весь рабочий диапазон 1200...1800 мин⁻¹, для эффективной нагрузки дизеля, установлено, что подачу газа целесообразно осуществлять в диапазоне средних эффективных давлений 0,7...1,0 МПа, а количество газа следует ограничить 30 % от подачи дизельного топлива (ДТ) [3].

Основная часть

Для определения оптимальных скоростных и нагрузочных режимов работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с добавкой газа, обеспечивающих наибольший коэффициент полезного действия (КПД), сокращение расхода ДТ, при наименьшем содержании в отработанных газах (ОГ) сажи, в исследованиях был реализован трехуровневый план эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов. Факторы и уровни их варьирования выбраны с учетом реализации плана первого порядка и приведены в табл. 1.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов при реализации плана эксперимента при определении оптимальных нагрузочных и скоростных режимов работы дизеля

| Кодирование значения факторов | Наименование фактора | Уровни факторов | | |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | | (-1) | 0 | (+1) |
| X ₁ | Эффективная нагрузка дизеля P _е , Па | 0,7·10 ⁶ | 0,85·10 ⁶ | 1,0·10 ⁶ |
| X ₂ | Частота вращения коленчатого вала n, с ⁻¹ | 20 | 25 | 30 |
| X ₃ | Содержание газа С, % | 0 | 15 | 30 |

В качестве критериев оптимизации были приняты, соответственно: часовой расход ДТ G_{дт}, кг/с; эффективный КПД η_е; содержание сажи в ОГ дизеля.

Производилась рандомизация экспериментов с использованием таблиц случайных чисел [4].

Обработка результатов проводилась в следующей последовательности: 1) определяли дисперсию ошибок экспериментов; 2) проверяли однородности дисперсий ошибок опытов с помощью критерия Кохрена; 3) определяли коэффициенты модели регрессионного анализа по формулам, приведенным в литературе [5, 6, 7] для плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка; 4) проводили оценку значимости коэффициентов регрессии по *t*-критерию Стьюдента путем нахождения доверительного интервала для каждого коэффициента; 5) проводили оценку адекватности математических моделей экспериментальным данным по *F*-критерию Фишера.

Во всех опытах задавались доверительной вероятностью *p* = 0,95. Обработку опытных данных проводили на ПЭВМ при помощи программ Microsoft Excel, Statgraphics Plus 5.1. Построение поверхностей отклика полученных моделей регрессии осуществляли с использованием ПЭВМ при помощи программ Statgraphics Plus 5.1 [8] и Corel DRAW X6 при фиксированных значениях уровня фактора X₂ – частота вращения коленчатого вала (с⁻¹) – на верхнем уровне (+1) (при номинальной частоте вращения коленчатого вала тракторного дизеля), и изменяющихся факторах X₁ – среднее эффективное давление, (Па), X₃ – подача газа, (доли).

После реализации плана эксперимента и исключения незначимых коэффициентов было получено следующее уравнение регрессии, описывающее изменение часового расхода топлива:

$$G_{дт} = 0,00247 + 0,0004 \cdot X_1 + 0,00063 \cdot X_2 - 0,00047 \cdot X_3 + 0,0001 \cdot X_1 X_2 - 0,00008 \cdot X_1 X_3 + 0,00004 \cdot X_2^2 - 0,00012 \cdot X_2 X_3 + 0,00016 \cdot X_3^2, \text{ кг/с.} \quad (1)$$

При проверке соответствия полученной модели опытным данным по *F*-критерию Фишера (вероятность *p* = 0,95) оказалось, что модель адекватно описывает реальный процесс.

На рис. 1 показана часть поверхностей отклика, построенных по уравнению (1) при фиксированном уровне фактора X₂ (частота вращения).

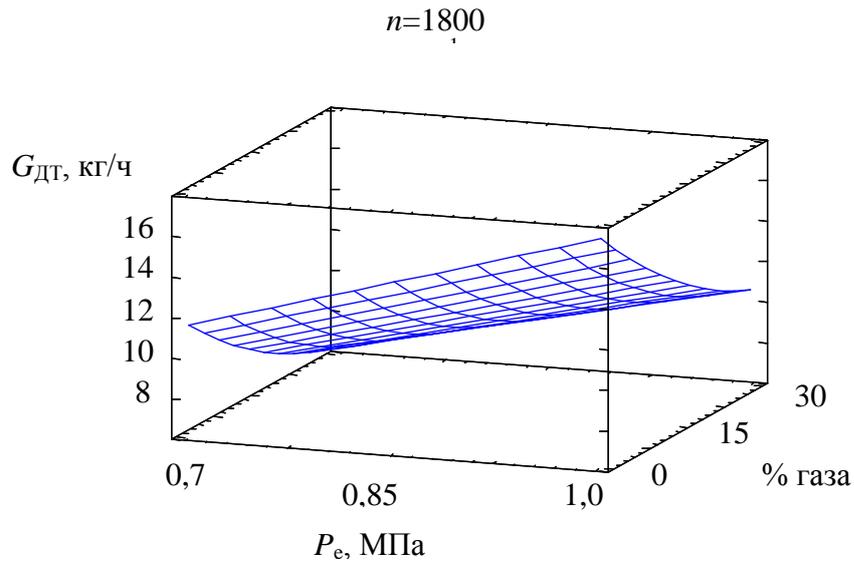


Рис. 1. Зависимость часового расхода ДТ ($G_{\text{ДТ}}$) от факторов X_1 и X_3 при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля $n=1800 \text{ мин}^{-1}$

Анализ (рис. 1) показывает, что подача газового топлива способствует снижению расхода ДТ. При этом наибольшая экономия обоих видов топлива достигается при подаче газа 15..25 % во всем представленном диапазоне (0,7..1,0 МПа) среднего эффективного давления в цилиндре дизеля. Для оценки эффективности теплоиспользования в цилиндрах дизеля было реализовано планирование эксперимента с использованием главного критерия оптимизации – эффективного КПД.

После реализации плана эксперимента и исключения из уравнения незначимых коэффициентов, было получено следующее уравнение регрессии, описывающее изменение эффективного КПД дизельного двигателя:

$$\eta_e = 0,4 + 0,0069 \cdot X_1 - 0,0040 \cdot X_2 + 0,0043 \cdot X_3 - 0,0054 \cdot X_1^2 + 0,0052 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0133111 \cdot X_2^2. \quad (2)$$

Проверка соответствия полученной модели опытным данным по F -критерию Фишера (вероятность $p = 0,95$) показала, что модель адекватно описывает реальный процесс.

На рис. 2 показаны поверхности отклика, построенные по уравнению (2) при фиксированном уровне фактора X_2 (частота вращения).

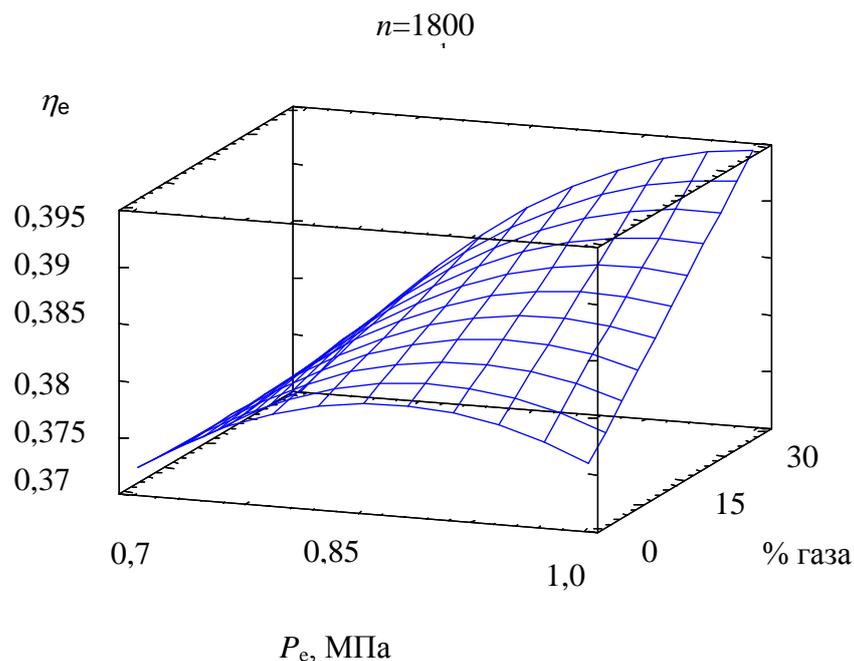


Рис. 2. Зависимость эффективного КПД дизеля (η_e) от факторов X_1 и X_3 при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля $n=1800 \text{ мин}^{-1}$

Анализ полученных данных (рис. 2) показывает, что подача газа в значительной степени влияет на величину эффективного КПД дизеля. Увеличение подачи газа в области эффективной нагрузки 0,8...1,0 МПа влечет за собой увеличение значения эффективного КПД от 0,38 до 0,393. При этом наибольшее его значение наблюдаются при подаче газа на уровне 15...30 %.

Для определения важного критерия оптимизации – содержания в отработавших газах частиц сажи (C) – было реализовано планирование эксперимента. После реализации эксперимента и исключения из уравнения незначимых коэффициентов было получено следующее уравнение регрессии:

$$C = 0,0831 + 0,0556 \cdot X_1 - 0,01452 \cdot X_2 - 0,0346 \cdot X_3 + 0,0187 \cdot X_1^2 - 0,0316 \cdot X_1 X_3 + 0,0285 \cdot X_2^2 + 0,0271 \cdot X_3^2. \quad (3)$$

Проверка соответствия полученной модели опытным данным по F -критерию Фишера (вероятность $p = 0,95$) показала, что модель адекватно описывает реальный процесс.

На рис. 3 показаны поверхности отклика, построенные по уравнению (3) при фиксированном уровне фактора X_2 (частота вращения).

Анализ полученной графической зависимости (рис. 3) показывает, что при значениях эффективной нагрузки 0,70...0,90 МПа, увеличение подачи газа до 10 % влечет некоторое снижение частиц сажи в ОГ, однако подача газа 10...30 % способствует росту в ОГ частиц сажи в данном диапазоне нагрузок. При более высокой эффективной нагрузке 0,90...1,0 МПа, увеличение подачи газа существенно меняет характер изменения содержания сажи в ОГ в сторону снижения содержания частиц сажи в ОГ. При этом подача 15...25 % газа снижает количество сажи в ОГ в 1,5...2 раза.

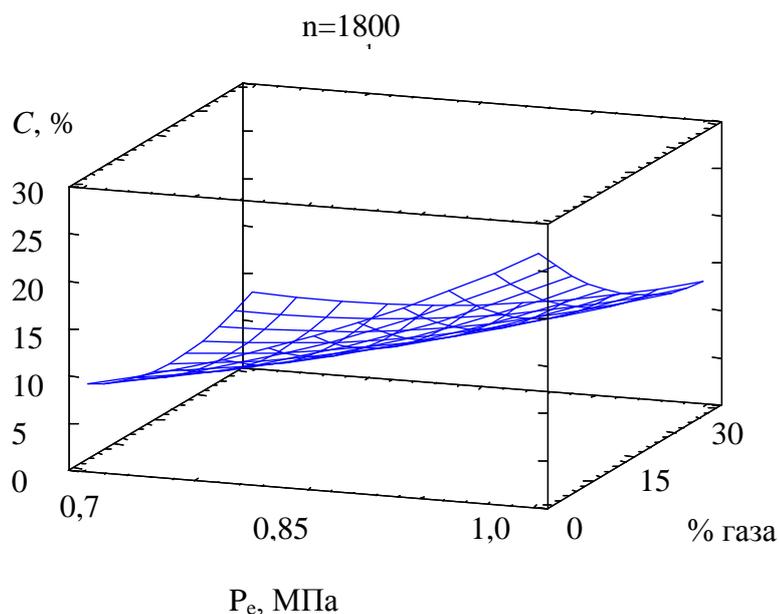


Рис. 3. Зависимость содержания сажи в отработавших газах дизеля от факторов X_1 и X_3 при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

На основании анализа полученных уравнений регрессии можно сказать, что экстремумы функций всех трех критериев оптимизации (η_e , $G_{\text{дт}}$ и C) достигаются при различном сочетании изучаемых факторов (P_e (X_1), n (X_2), G_T (X_3)).

- Максимальное значение $\eta_{e \max} = 0,4123$ при: $X_1 = 1$; $X_2 = -0,15$; $X_3 = 1$;
- Минимальное значение $G_{\text{дт} \min} = 5,22 \text{ кг/ч}$ при $X_1 = -1$; $X_2 = -1$; $X_3 = 0,87$;
- Минимальное значение $C_{\min} = 4,43 \%$ при $X_1 = -1$; $X_2 = 0,255$; $X_3 = 0,055$.

Заключение

1. В результате проведенных исследований получены регрессионные зависимости, отражающие влияние эффективного КПД часового расхода ДТ, содержание частиц сажи в ОГ тракторного дизеля от эффективной нагрузки и подачи газа на номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя.

2. 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.

3. Сокращение расхода дизельного топлива и повышение эффективного КПД тракторного дизеля наблюдаются в области эффективной нагрузки $0,7 \dots 0,85 \text{ МПа}$, при подаче газа на уровне $0 \dots 10 \%$, в области эффективной нагрузки $0,85 \dots 1,0 \text{ МПа}$, при подаче газа на уровне $10 \dots 30 \%$ от ДТ.

4. Для достижения наибольшего снижения выбросов частиц сажи с отработавшими газами тракторным дизелем, необходимо осуществлять подачу газового топлива в пределах $20 \dots 30 \%$ при эффективной нагрузке $0,9 \dots 1,0 \text{ МПа}$ и пропорционально уменьшать по мере снижения нагрузки тракторного дизеля. При $P_e = 0,7 \text{ МПа}$ и менее, в цилиндры дизеля следует подавать только ДТ.

5. Построенные поверхности отклика показывают влияние на критерии оптимизации факторов X_1 и X_3 при фиксировании фактора X_2 (n) на уровне, при котором обеспечивается максимальное $\eta_{e \max} = 0,4123$ ($X_2 = -0,15$), минимальное $G_{\text{дт} \min} = 0,00145$

($X_2=-1$) и минимальное $C_{min} = 0,0443$ ($X_2=0,255$). Таким образом, необходимо искать область рационального сочетания факторов исходя из значимости каждого критерия оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Карташевич, А. Н. Исследование эффективности работы дизельного двигателя с подачей сжиженного газа / А. Н. Карташевич П. Ю. Малышкин // Тракторы, автомобили и машины для природообустройства: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры мелиоративных и строительных машин УО БГСХА / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; редкол.: А. Н. Карташевич (гл. ред.) [и др.]. – Горки, 2018. – 101 с.
3. Карташевич, А. Н. Исследование эксплуатационных и экологических показателей колесного трактора с подачей газового топлива / А. Н. Карташевич П. Ю. Малышкин // Вестник СПбГУ. – 2014. – №3. С. 92–96.
4. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев Н. В. Смирнов. – М.: Наука, 1965. – 465 с.
5. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
6. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2- изд. / Ю. П. Адлер. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
7. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. Д. К. Монтгомери. – Л. Судостроение. – 1980. – 384 с.
8. Андреев, В. Л. Использование статистического пакета Statgraphics Plus 5.1 для обработки результатов экспериментальных исследований: методическое пособие / В. Л. Андреев. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. – 32 с.