

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОДАЧИ ТОПЛИВА НА ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ

EVALUATION OF THE EFFECT OF FUEL UNEVENNESS ON DIESEL PERFORMANCE

А.С. ДЕВЯНИНА

ООО «Джон Дир Русь», Домодедово, Россия, das-89@list.ru

A.S. DEVYANINA

John Deere RU, Domodedovo, Russia, das-89@list.ru

В подавляющем большинстве сельскохозяйственной техники в качестве двигателя используют дизель. Количество подаваемого топлива в цилиндры двигателя является основным фактором, определяющим его мощностные, экономические и экологические характеристики. Его можно рассматривать как величину, состоящую из двух частей: управляемой системы подачи топлива и неуправляемой, зависящей от качества работы системы. Ухудшение показателей двигателя тем больше, чем выше доля неуправляемой части подаваемого топлива. Отклонение количества подаваемого топлива от заданного может происходить в следующих случаях: неравномерность подачи топлива по цилиндрам двигателя; нестабильность процесса топливоподачи в цилиндр. Если неравномерность подачи топлива по цилиндрам регламентируется требованиями ГОСТ 10578-95 и допускается в зависимости от режима работы в пределах 6–35 %, то нестабильность подачи топлива от цикла к циклу не регламентируется стандартами и может достигать по данным других исследователей до 10–40 %. Совместное влияние этих параметров на процесс топливоподачи приводит к существенному отклонению цикловой подачи топлива. Проведенный теоретический анализ основных показателей двигателя показал, что увеличение неравномерности приводит к их изменению, которое ухудшает показатель. Это ухудшение тем больше, чем больше степень кривизны линии изменения показателя двигателя от изменения расхода топлива. На основании приведенных результатов сделаны следующие выводы: увеличение неравномерности и нестабильности топливоподачи приводит к ухудшению основных показателей двигателя; степень ухудшения показателей двигателя тем больше, чем больше неравномерность и нестабильность и чем выше нелинейность кривой изменения показателя от расхода топлива; в настоящее время величина нестабильности топливоподачи не регламентируется, что не позволяет управлять качеством процесса.

Ключевые слова: качество работы дизеля, показатели дизеля, топливная аппаратура дизелей, нестабильность цикловой подачи, метод определения цикловой подачи.

In the vast majority of agricultural machinery, diesel is used as the engine. The amount of fuel supplied to the engine cylinders is the main factor determining its power, economic and environmental characteristics. It can be considered as a value composed of two parts: a controllable fuel supply system and uncontrolled, depending on the quality of the system. The deterioration in the performance of the engine is greater, the higher the proportion of uncontrolled part of the fuel supplied. The deviation of the amount of fuel supplied from a given fuel can occur in the following cases: uneven fuel delivery along the engine cylinders; instability of the fuel supply to the cylinder. If the uneven fuel flow through the cylinders is regulated by the requirements of GOST 10578-95 and is allowed depending on the operating mode from 6 to 35 %, then the instability of fuel supply from cycle to cycle is not regulated by standards and can be as high as 10-40 % according to other researchers. The combined influence of these parameters on the fuel supply process leads to a significant deviation in the cyclic fuel supply. The theoretical analysis of the main parameters of the engine showed that an increase in unevenness leads to a change in them, which worsens the indicator. This deterioration is the greater, the greater the degree of curvature of the line of change in the engine index from the change in fuel consumption. Based on the above results, the following conclusions are drawn: an increase in the unevenness and instability of fuel supply leads to a deterioration in the main engine performance; the degree of deterioration in the performance of the engine is greater the greater the unevenness and instability and the higher the nonlinearity of the curve of the change in the index from the fuel consumption; at present, the instability of fuel supply is not regulated, which does not allow controlling the quality of the process.

Keywords: quality of diesel operation, diesel performance, diesel fuel equipment, instability of cyclic feed, method for determining the cyclic feed rate.

Введение

Мощностные, экономические и экологические показатели дизелей определяют их качественные характеристики. Эти показатели тесно взаимосвязаны с качеством регулировки и работы их топливной аппаратуры, обеспечивающей должным образом процесс топливоподачи. Среди большого количества влияющих факторов процесса топливоподачи (момент начала подачи, качество распыливания и распределения топлива по камере сгорания, интенсивность подачи топлива и др.) основным остается количество подаваемого топлива [1–3].

Изменение количества подаваемого топлива, с одной стороны, обеспечивает регулирование мощности двигателя, а с другой, оказывает влияние на его экономичность работы, выбросы токсичных компонентов, тепловую нагруженность деталей, образующих камеру сгорания [4–6]. Такое влияние топливоподачи на показатели двигателя требует аккуратного отношения к данному параметру, иначе это может приводить не только к ухудшению экологических, мощностных и показателей экономичности работы, но и вызвать выход его из строя [7].

Цель исследования

Дать теоретические подходы к оценке влияния неравномерности подачи топлива на показатели дизеля.

Материалы, методы исследования и обсуждение результатов

Количество подаваемого топлива в цилиндры двигателя можно рассматривать как величину, состоящую из двух частей: управляемой системы подачи топлива x и неуправляемой Δx , зависящей от качества работы системы. По оценкам исследователей этого вопроса, ухудшение показателей двигателя тем больше, чем выше доля неуправляемой части подаваемого топлива [4, 8]. Неуправляемую часть цикловой подачи топлива Δx можно также разделить на две составляющие:

1-я – связанная с систематической ошибкой регулировки и отклонений размеров деталей топливной аппаратуры в пределах допусков на изготовление;

2-я – связанная с нестабильностью процесса топливоподачи, во многом определяемая наличием зазоров и нестабильностью управляющего воздействия.

Первая составляющая неуправляемой части регламентируется требованиями ГОСТ 10578-95 как неравномерность подачи топлива по цилиндрам и, например, для топливного насоса высокого давления (ТНВД) 4-цилиндрового двигателя допускается от 6 до 35 % в зависимости от режима работы при проверке на специализированном стенде с комплектом эталонной аппаратуры. Понятно, что при установке отрегулированного ТНВД на двигатель значение неравномерности станет еще больше, так как и форсунки, и топливопроводы высокого давления имеют разброс своих характеристик гораздо больше, чем эталонные.

В отличие от первой – вторая составляющая неуправляемой части не регламентируется требованиями стандартов. По данным различных исследователей она может составлять от 10 до 60 % в зависимости от режима работы и состояния топливной аппаратуры [9, 10]. В результате совместного влияния результат неравномерности подачи может достигать существенной величины отклонения цикловой подачи топлива от среднего значения, что негативно сказывается на работе двигателя.

Исследования по влиянию неравномерности подачи топлива в цилиндры двигателя на его показатели свидетельствуют о нелинейном характере этой зависимости. Для неравномерности в пределах до 6–10 % ею можно пренебречь, а при 40–60 % это может приводить к снижению мощности двигателя на 5–7 % и ухудшения экономичности до 2–5 % [9, 11]. Причем, степень влияния неравномерности подачи топлива на разных двигателях и режимах работы может отличаться довольно существенно и объяснение причин такой разницы эффектов не приводится, а также отсутствует алгоритм расчета такой оценки.

Объяснение отмеченной причины и количественной оценки влияния неравномерности подачи топлива на показатели двигателя может быть получено при следующем подходе к решению задачи.

Обычно оценку влияния количества подаваемого топлива на его показатели производят по регулировочной характеристике двигателя, представляющей зависимость эффективных показателей, токсичных выбросов и температуры отработавших газов от часового расхода топлива при постоянной частоте вращения вала.

На рис. 1 представлена регулировочная характеристика, полученная для тракторного двигателя Д-120 на частоте вращения 1800 мин⁻¹ [12]. На характеристике показано изменение эффективной мощности N_e , удельного расхода топлива g_e , температуры отработавших газов $T_{ор}$ и дымности C . Из анализа характеристики следует, что при изменении часового расхода топлива G_T приведенные показатели изменяются нелинейно. Причем, вид одних кривых имеет выпуклый характер (N_e), а других – вогнутый (g_e , $T_{ор}$ и C).

Между часовым расходом топлива и цикловой подачей топлива имеется следующая взаимосвязь:

$$G_T = 3 \cdot 10^{-8} \rho_T n i_{ц} V_{ц}$$

где $V_{ц}$ – цикловая подача топлива, мм³; ρ_T – плотность топлива, кг/м³; n – частота вращения, мин⁻¹; $i_{ц}$ – количество цилиндров в двигателе.

Так как регулировочная характеристика снимается при постоянной частоте вращения, число цилиндров также неизменно, а изменением плотности топлива можно пренебречь, то вид характеристики не изменится при ее перестроении от цикловой подачи топлива.

Изменение какого-либо показателя K двигателя от цикловой подачи топлива V может быть аппроксимировано с хорошей достоверностью полиномом второй степени в виде:

$$K = a + bV + cV^2, \quad (1)$$

где K – показатель двигателя; a , b , c – коэффициенты; V – цикловая подача.

В процессе работы двигателя, в результате неравномерности подачи топлива, цикловая подача в цилиндры может отличаться от среднего значения на величину ΔV , то есть составлять $V \pm \Delta V$. Рассмотрим это на примере мощности 2-цилиндрового двигателя, как показано на рис. 2.

Мощность каждого цилиндра N зависит от подачи топлива V , которую в соответствии с выражением (1) можно записать в виде:

$$N = a + bV + cV^2,$$

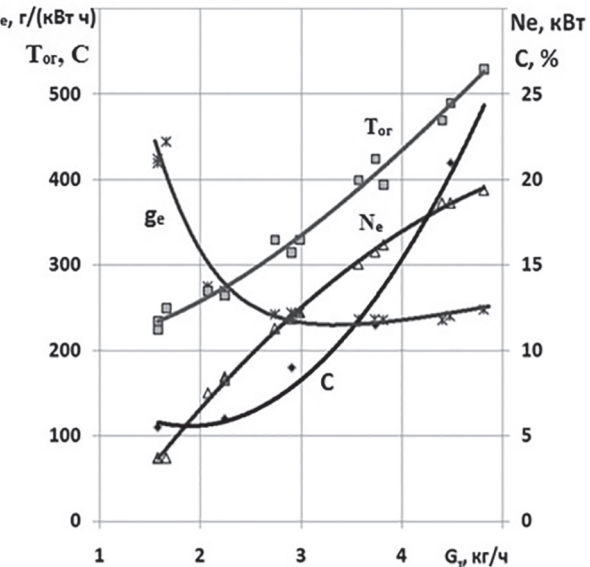
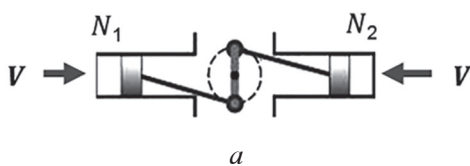


Рис. 1. Регулировочная характеристика дизеля Д-120 по расходу топлива при частоте вращения 1800 мин⁻¹: \times – g_e ; \square – $T_{ор}$; Δ – N_e ; \star – C

Для случая одинаковой подачи топлива в каждый цилиндр V (рис. 2, а), имеем равные мощности каждого цилиндра, и мощность двигателя составит:

$$N = N_1 + N_2 = 2(a + bV + cV^2). \quad (2)$$

Для случая, когда суммарная подача в двигатель будет такая же ($2V$), но в один цилиндр будет подано $V_1 = (V + \Delta V)$, а в другой – $V_2 = (V - \Delta V)$, где ΔV – отклонение цикловой подачи от среднего значения (рис. 2, б), будем иметь мощности для каждого цилиндра соответственно:

$$N_1 = a + b(V + \Delta V) + c(V + \Delta V)^2;$$

$$N_2 = a + b(V - \Delta V) + c(V - \Delta V)^2,$$

а мощность двигателя составит после преобразования:

$$N_e = N_1 + N_2 = 2a + 2bV + 2cV^2 + 2c\Delta V^2. \quad (3)$$

Как следует из результатов полученной мощности двигателя по выражениям (2) и (3), разница между нами будет составлять:

$$\Delta N = 2c\Delta V^2. \quad (4)$$

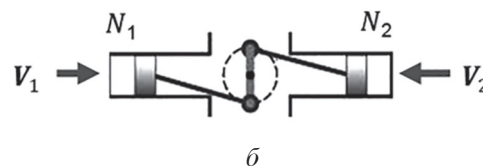


Рис. 2. Мощность двигателя при разных условиях подачи топлива: а – в оба цилиндра подача V ; б – в один цилиндр V_1 , в другой V_2

Таким образом, полученное выражение показывает, что при отклонении цикловой подачи от среднего значения происходит изменение мощности двигателя, и это изменение тем больше, чем больше коэффициент c и чем больше отклонение ΔV , причем, от ΔV зависимость квадратичная.

Пояснение указанной ситуации приведено на рис. 3 для случая квадратичных полиномов, имеющих разные знаки коэффициента c . Для показателя K , имеющего в уравнении (1) коэффициент $c < 0$ (рис. 3, а), при цикловой подаче V показатель имеет значение K . При цикловой подаче V_1 показатель имеет значение K_1 , а при цикловой подаче V_2 – значение K_2 . Среднее значение между K_1 и K_2 лежит на середине отрезка прямой, соединяющей эти точки. Среднее значение меньше величины K на ΔK .

Для показателя K , имеющего в уравнении (1) коэффициент $c > 0$ (рис. 3, б), при цикловой подаче V показатель аналогично имеет значение K . Также и при цикловой подаче V_1 имеем K_1 , а при V_2 имеем K_2 . Однако среднее значение уже больше величины K на ΔK .

Величина разницы в показателе K , также как и в выражении (4), будет равна:

$$K = cV^2. \quad (5)$$

Анализ полученного выражения (5) показывает, что для показателя, имеющего $c > 0$, это приведет к его увеличению, а при $c < 0$ – к его уменьшению. Чем больше величина c и ΔV , тем больше это изменение. При $c = 0$ (линейная зависимость) значение показателя сохраняется, и оно от неравномерности топливоподачи не зависит.

В табл. 1 приведены основные показатели двигателя и значения коэффициента c для них. Анализ результатов показывает, что увеличение неравномерности топливоподачи приводит к ухудшению показателей двигателя. Это ухудшение тем больше, чем больше модуль коэффициента $|c|$, характеризующий степень кривизны линии изменения показателя K от изменения расхода топлива.

Заключение

Увеличение неравномерности и нестабильности топливоподачи приводит к ухудшению

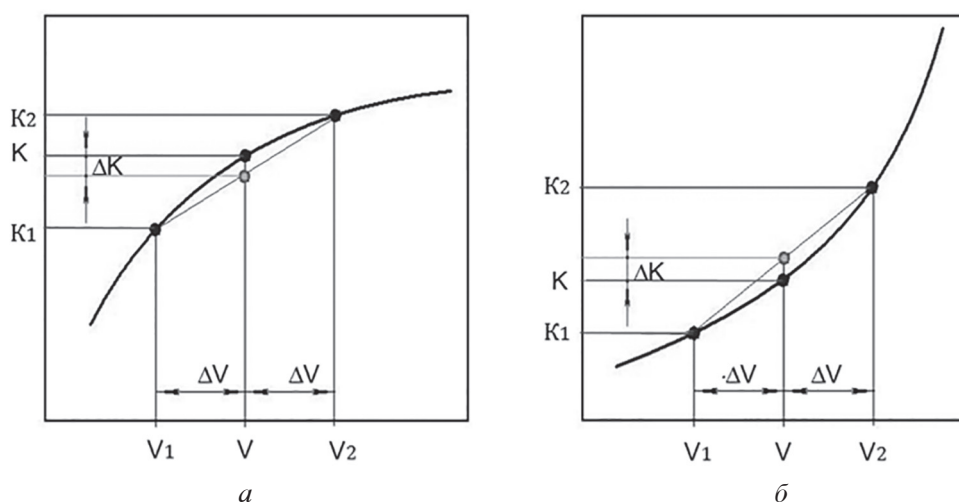


Рис. 3. Изменение значений показателя K от цикловой подачи V :
 а – для кривой с коэффициентом $c < 0$; б – для случая, когда $c > 0$

Таблица 1

Основные показатели двигателя и значения коэффициента c для них

№	Показатель	Значение c	Изменение среднего значения показателя при наличии неравномерности
1	Эффективная мощность	< 0	уменьшается
2	Удельный эффективный расход топлива	> 0	увеличивается
3	Температура отработавших газов	> 0	увеличивается
4	Дымность	> 0	увеличивается

основных показателей двигателя. Степень ухудшения показателей двигателя тем больше, чем больше неравномерность и нестабильность и чем выше нелинейность кривой изменения показателя от расхода топлива (чем больше коэффициент c). В настоящее время величина нестабильности топливоподачи не регламентируется, что не позволяет управлять качеством процесса.

Литература

1. Габитов И.И., Грехов Л.В., Неговора А.В. Техническое обслуживание и диагностика топливной аппаратуры автотракторных дизелей. Уфа: Изд-во БГАУ, 2008. 240 с.
2. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М.: Легион-Автodata, 2004. 344 с.
3. Марков В.А., Козлов С.И. Топлива и топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей. М.: МГТУ им. Баумана, 2000. 296 с.
4. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. 480 с.
5. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. 720 с.
6. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: МГТУ им. Баумана, 2002. 376 с.
7. Чистяков А.Ю. Исследование межциклового нестабильности процессов топливоподачи дизелей при работе на режимах малых подач и частот вращения: дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2006. 202 с.
8. Габдрафиков Ф.З. Повышение эксплуатационных показателей машинно-тракторных агрегатов посредством разработки технологических приемов улучшения равномерности топливоподачи в их дизелях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург – Пушкин, 2004. 34 с.
9. Неговора А.В. Оценка влияния межциклового неравномерности топливоподачи на технико-экономические показатели одноцилиндрового двигателя: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург-Пушкин, 1997. 24 с.
10. Габитов И.И. Разработка установки для исследования неравномерности топливоподачи в тракторных дизелях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1991. 23 с.
11. Васов М.Ю. Повышение эффективности рабочих процессов атмосферных и наддувных поршневых ДВС за счет улучшения межциклового стабильности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2012. 15 с.
12. Бижаев А.В. Повышение экологической безопасности тракторного дизеля добавкой воды в цилиндры: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 197 с.

References

1. Gabitov I.I., Grekhov L.V., Negovora A.V.. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i diagnostika toplivnoy apparatury avtotraktornykh dizeley [Maintenance and diagnostics of fuel equipment of automotive diesel engines]. Ufa: Izd-vo BGAU Publ., 2008. 240 p.
2. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley [Fuel equipment and control systems for diesel engines]. Moscow: Legion-Avtodata Publ., 2004. 344 p.
3. Markov V.A., Kozlov S.I. Topliva i toplivopodacha mnogotoplivnykh i gazodizel'nykh dvigateley [Fuel and fuel supply of multi-fuel and gas-diesel engines]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2000. 296 p.
4. Sistemy upravleniya dizel'nyimi dvigatelyami [Diesel engine control systems]. Perevod s nemetskogo. Moscow: ZAO «KZHI «Za rulem» Publ., 2004. 480 p.
5. Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of reciprocating engines. Special chapters]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2008. 720 p.
6. Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [Toxicity of exhaust gases of diesel engines]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002. 376 p.
7. Chistyakov A.Yu. Issledovanie mezhtsiklovy nestabil'nosti protsessov toplivopodachi dizeley pri rabote na rezhimakh malykh podach i chastot vrashcheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of inter-cycle instability of diesel fuel supply processes in operation at low feed rates and rotational speeds: Dissertation for Scientific degree of Candidate of Technical Sciences]. Khabarovsk, 2006. 202 p.
8. Gabdrifikov F.Z. Povyshenie ekspluatatsionnykh pokazateley mashinno-traktornykh agregatov posredstvom razrabotki tekhnologicheskikh priemov uluchsheniya ravnomernosti toplivopodachi v ikh dizelyakh: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Improving the performance of machine and tractor units by developing techniques for improving fuel uniformity in their diesel engines: Dissertation for Scientific degree of Doctor of Technical Sciences]. Sankt-Peterburg – Pushkin, 2004. 34 p.

9. Negovora A.V. Otsenka vliyaniya mezhtsiklovoy neravnomernosti toplivopodachi na tekhniko-ekonomicheskie pokazateli odnotsilindrovogo dvigatelya: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk [Evaluation of the effect of inter-cycle fuel unevenness on the technical and economic performance of a single-cylinder engine: Abstract for Dissertation for Scientific degree of Candidate of Technical Sciences]. Sankt-Peterburg – Pushkin, 1997. 24 p.
10. Gabitov I.I. Razrabotka ustanovki dlya issledovaniya neravnomernosti toplivopodachi v traktornykh dizelyakh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of an installation for the study of fuel unevenness in tractor diesel engines: Abstract for Dissertation for Scientific degree of Candidate of Technical Sciences]. Ufa, 1991. 23 p.
11. Vasov M.Yu. Povyshenie effektivnosti rabochikh protsessov atmosferykh i nadduvnykh porshnevnykh DVS za schet uluchsheniya mezhtsiklovoy stabil'nosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Increase of efficiency of working processes of atmospheric and supercharged piston engines due to improvement of intercycle stability: Abstract for Dissertation for Scientific degree of Candidate of Technical Sciences]. Tula, 2012. 15 p.
12. Bizhaev A.V. Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti traktornogo dizelya dobavkoy vody v tsilindry: dis. ... kand. tekhn. nauk [Increase of ecological safety of a tractor diesel engine by adding water to the cylinders: Dissertation for Scientific degree of Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 2016. 197 p.