ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ПРОЦЕССА ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА

Ключевые слова: *система топливоподачи; дизельный двигатель; удельный расход топлива; топливный насос.*

Введение. В условиях реальной эксплуатации автотракторная техника значительное время работает на малоэнергоемких работах в режимах частичных нагрузок. Такие режимы эксплуатации обуславливают повышение расхода топлива из-за ухудшения качества работы топливной системы дизелей, обеспечивающих высокие технико-экономические показатели на номинальном режиме [4]. В отечественных тракторных дизелях широко используются надежные в эксплуатации топливные системы непосредственного действия. Однако при переходе на частичные режимы нагрузки технико-экономические и экологические показатели работы дизелей существенно ухудшаются из-за резкого снижения качества смесеобразования (уменьшение давления впрыскивания топлива). Целый ряд отрицательных последствий вызывает уменьшающаяся по мере снижения нагрузки равномерность процесса подачи топлива по циклам и цилиндрам. Одним из менее затратных возможных путей решения этой задачи для дизелей с системой топливоподачи непосредственного действия может быть совершенствование процесса и закона топливоподачи.

Решение проблемы повышения экономичности работы тракторных дизелей облегчается при обеспечении высоких давлений и интенсивности впрыскивания топлива, способствующих повышению равномерности (идентичности) и улучшению распыла топлива, более полному его сгоранию в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы [1–3].

Цель и задачи исследования: повышение экономичности работы тракторного дизеля с системой топливоподачи непосредственного действия. Основной задачей исследования является интенсификация процесса впрыскивания топлива и улучшение равномерности его подачи с разработкой насоса с повышенной энергетикой впрыскивания.

Материалы и методы исследования: закон топливоподачи топливной системы непосредственного действия. Математическое моделирование работы топливной системы дизеля с опытным законом топливоподачи и проведение сравнительных безмоторных стендовых и моторных

испытаний двигателя при работе в комплектации со штатным топливным насосом высокого давления (ТНВД) и в комплектации с опытным ТНВД с усовершенствованным законом топливоподачи (УЗТ).

Результаты исследований. Проведенный нами анализ показывает, что наиболее распространенные методы повышения интенсивности впрыскивания, связанные с увеличением объемной скорости нагнетания топлива, требуют порой значительных изменений в производстве, которые иногда делают невозможной модернизацию выпускаемой аппаратуры и приводят к необходимости создания аппаратуры новой размерности.

При всех преимуществах, предложенных различными авторами методов интенсификации процесса впрыскивания, они требуют значительных переделок топливоподающей системы и не исключают необходимости ее доводки после изготовления. В этой связи является актуальным поиск и разработка технологических и технических решений, позволяющих эффективно использовать те методы повышения интенсивности впрыскивания, которые не требуют значительной перестройки производства, серийно выпускаемой, технологически и конструктивно хорошо доведенной и надежной в эксплуатации топливной аппаратуры непосредственного действия.

Повысить интенсивность топливоподачи можно воздействием на конструктивно-регулируемые элементы системы (рисунк 1).

Подавляющее большинство топливных насосов высокого давления в системах топливоподачи непосредственного действия имеют жесткий привод плунжера в виде кулачковых механизмов. В настоящее время для ведомого звена кулачковых механизмов топливных насосов используется в основном дуговой и тангенциальный законы движения. Так, движение ведомого звена кулачкового механизма топливного насоса высокого давления 4УТНИ задается тангенциальным законом. Как известно, кулачковый механизм топливного насоса высокого давления 4УТНИ работает в следующих условиях: переменный скоростной режим, высокие

скорости, большие нагрузки, наличие в смазке дизельного топлива. Применение законов движения с мягкими ударами ограничивается их допустимыми скоростными режимами, которые ниже номинального режима работы топливного

насоса 4УТНИ. Безударные законы движения удовлетворяют требуемым условиям работы топливного насоса 4УТНИ, наиболее оптимальным из которых является синусоидальный закон движения плунжера.

Рисунок 1
Обобщенные структурно-регулировочные элементы топливной системы дизеля

Уравнение перемещения по синусоидальному закону имеет вид:

$$y = \frac{s}{\pi} \left(\frac{\pi \varphi_T}{\varphi} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi \varphi_T}{\varphi} \right). \quad (1)$$

Дифференцирование уравнения перемещения (1) дает выражение для скорости и ускорения плунжера:

$$v = \frac{dy}{dt} = \frac{h\omega}{\varphi} \left(1 - \cos \frac{2\pi \varphi_T}{\varphi} \right); \quad (2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{2\pi\omega^2}{\varphi^2} \sin \frac{2\pi \varphi_T}{\varphi}, \quad (3)$$

где φ – угол поворота коленчатого вала; φ_T – текущий угол поворота кулачкового вала; ω – угловая скорость кулачкового вала; s – перемещение плунжера; h – перемещение плунжера за активный ход.

Для осуществления аналитического расчета в программе Excel, задаваясь требованием уменьшения угла φ , с одной стороны, и требованием недопустимости превышения угла давления в системе, когда кулачок-толкатель выше максимального значения, чем угол давления серийного насоса, с другой стороны, рассчитали профиль кулачка, его скорость и ускорение. При этом учитывались геометрические размеры основных звеньев кулачкового механизма насоса 4УТНИ. На основании теоретических исследований было установлено, что оптимальным профилем кулачка для привода плунжера топливного насоса 4УТНИ для обеспечения наиболее эффективной топливоподачи является профиль с синусоидальным законом движения плунжера, способный обеспечить движение плунжера без

резкого скачка ускорений, со сниженными боковыми давлениями, вибрациями, износом, напряжениями, шумом и толчками. Сравнительные расчеты показали, что корпус насоса выдерживает увеличенную нагрузку, а кулачковый вал имеет запас усталостной прочности [5].

На основе анализа и обзора технических требований по итогам проделанных расчетов были предложены технические решения по разработке опытного топливного насоса с усовершенствованным законом топливоподачи и был изготовлен новый кулачковый вал для интенсификации процесса впрыскивания с применением синусоидального закона движения [6].

Предварительно был проведен комплекс безмоторных экспериментальных исследований со штатным и опытным топливными насосами, последний изготовлен на основе предварительных теоретических исследований с синусоидальным законом движения плунжера, обеспечивающим повышенное давление впрыскивания топлива, меньшие нагрузки на кулачковый механизм при более высоких скоростях и безударности движения плунжера.

Разработанный опытный насос УЗТ показал высокую работоспособность, позволил значительно увеличить интенсивность впрыскивания топлива (рисунок 2). При снижении частоты вращения коленчатого вала двигателя падение давления нагнетания у штатной системы топливоподачи происходит значительно быстрее, чем у системы с УЗТ. При пусковых частотах вращения коленчатого вала двигателя формирование процесса впрыскивания у дизеля со штатной си-

стемой топливоподачи происходит вяло и длительно, тогда как у дизеля в комплектации с опытной системой процесс впрыскивания происходит с большой интенсивностью, четкими границами начала и конца, что благоприятно сказывается на пусковых качествах дизеля. На номинальной частоте вращения кулачкового вала давление у штуцера форсунки системы топливоподачи в комплектации с опытным ТНВД с УЗТ выше, чем при с ТНВД 4УТНИ, на 9 %. При снижении частоты вращения кулачкового вала разница давлений увеличивается: при 800 мин^{-1} разница составила 10,5 %, при 600 мин^{-1} – 11,7 %, при 400 мин^{-1} – 14,5 %, а при 200 мин^{-1} – 16,8 % (рисунок 3а).

Снижение интенсивности нагнетания топлива при уменьшении частоты вращения кулачкового вала насоса объясняется увеличением времени активного хода плунжера, при этом увеличивается количество топлива, перетекаемого из надплунжерного пространства через уплотнения прецизионной пары. При номинальной частоте вращения кулачкового вала насоса система топливоподачи в комплектации с опытным ТНВД с УЗТ обеспечивает интенсивность нагнетания на 9 % выше, чем в комплектации с ТНВД 4УТНИ (рисунок 3 б).

При пусковой частоте вращения кулачкового вала насоса система топливоподачи в комплектации с опытным ТНВД с УЗТ также обеспечивала интенсивность нагнетания на 18,4 % выше. Равномерность распределения топлива при этом по секциям у опытной системы топливоподачи была выше, чем при штатной системе топливоподачи, причем при снижении частоты вращения кулачкового вала насоса эта разница существенно возрастала. Так, при частоте $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ равномерность между секциями была выше на 1,1 %, а при частоте $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ – на 18 %. Выявлено, что дизель в комплектации с опытным ТНВД имеет более легкий запуск за счет качественной топливоподачи на пусковых режимах. Скоростные и нагрузочные характеристики дизеля в комплектации с ТНВД 4УТНИ и в комплектации с опытным ТНВД с УЗТ приведены на рисунке 4.

При использовании системы с УЗТ оптимальный угол опережения впрыскивания был меньше на три градуса по сравнению с базовой системой топливоподачи, что объясняется более ранним началом впрыска из-за более быстрого достижения топливом давления открытия форсунки вследствие интенсификации процесса его нагнетания.

Рисунок 2
Осциллограммы давления топлива
у штуцера форсунки у опытного с УЗТ (утолщенная линия) и у штатного (тонкая линия) насосов

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что при работе дизеля в комплектации с опытной системой топливоподачи его технико-экономические показатели были выше, особенно на малых частотах вращения коленчатого

вала дизеля. Так, при $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ удельный расход топлива составил $g_e = 271 \text{ г/(кВт·ч)}$, что ниже на 8,5 % по сравнению со штатной системой топливоподачи. Интенсификация процесса впрыскивания при работе дизеля в комплекта-

ции с опытным насосом с УЗТ обуславливает возрастание скорости и температуры сгорания, увеличивает скорость окислительных процессов – как следствие, повышается топливная экономичность дизеля. Следует отметить более устой-

чивую работу дизеля в комплектации с ТНВД с УЗТ на более низких скоростных режимах по сравнению с работой дизеля в комплектации с насосом 4УТНИ.

Рисунок 3

Графики зависимостей

а) давления и б) интенсивности впрыскивания — штатной и — опытной систем топливоподачи от частоты вращения коленчатого вала двигателя

Рисунок 4

Скоростная а) и нагрузочная б) характеристики дизеля Д-144 — в комплектации с опытным ТНВД с УЗТ; — в комплектации с ТНВД 4УТНИ

Выводы: На основании теоретических исследований был разработан топливный насос дизеля с усовершенствованным законом топливоподачи, который позволил повысить давление и интенсивность впрыскивания на 9 % и при малых частотах вращения коленчатого вала двигателя – до 14,5 %. Интенсификация процесса

впрыскивания топлива на основе технического решения (изменение закона топливоподачи) позволила увеличить экономичность работы тракторного дизеля, особенно на частичных режимах эксплуатации. Так в режиме $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ снижение удельного расхода топлива составило 8,5 % по сравнению со штатным.

Библиографический список

1. Астахов, И.В. Топливные системы и экономичность дизелей [Текст]: учебное пособие / И.В. Астахов, Я.Н. Голубков, В.Н. Трусов, А.С. Хачиян. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
2. Баширов, Р.М. Автотракторные двигатели: конструкция, основы теории и расчета

[Текст]: учебник / Р.М. Баширов. Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. 336 с.

3. Габитов, И.И. Обеспечение надежности топливной аппаратуры дизелей сельскохозяйственного назначения в процессе эксплуатации [Текст] / И.И. Габитов. СПб.: СПбГАУ, 2000. 317 с.

4. Габдрафиков, Ф.З. Оценка эксплуатационной эффективности топливных систем тракторных и комбайновых дизелей в режимах частичных нагрузок [Текст] / Ф.З. Габдрафиков. СПб.: СПбГАУ, 2004. 203 с.

5. Габдрафиков, Ф.З. Топливный насос с повышенной интенсивностью впрыскивания [Текст]

/ Ф.З. Габдрафиков, Ф.А. Шарифуллин // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 3. С. 25–26.

6. Топливный насос с повышенной интенсивностью нагнетания топлива [Текст]: патент на полезную модель RU 138914 U1 Ф.З. Габдрафиков, Ф.А. Шарифуллин, опубликовано 27.03.2014. Бюл. № 9.

Сведения об авторах

1. **Габдрафиков Фаниль Закариевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и физики, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: gabdrafikov@mail.ru.

2. **Галиакберов Урал Сагитович**, аспирант кафедры теплоэнергетики и физики, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: gauras01@mail.ru.

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований дизеля с топливной системой непосредственного действия с усовершенствованным законом топливо-

подачи, позволяющей повысить интенсивность впрыскивания топлива и экономичность работы дизеля в режимах частичных нагрузок и малых частот вращения коленчатого вала.

F. Gabdrafikov, U. Galiakberov

INCREASING DIESEL ENGINE EFFICIENCY BY INTENSIFIED FUEL INJECTION PROCESS

Key words: *fuel supply system; diesel engine; specific fuel consumption; fuel pump.*

Authors' personal details

1. **Gabdrafikov Fanil**, Doctor of technical sciences, professor of the Heat engineering and energy supply of enterprises chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Ocyabrya St., 34, e-mail: gabdrafikov@mail.ru.

2. **Galiakberov Ural**, Post-graduate student of the Chair of the Heat engineering and energy supply of enterprises chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Ocyabrya St., 34, e-mail: gauras01@mail.ru.

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of a direct fuel system diesel engine with an improved fuel supply law that makes

it possible to increase the injection rate of fuel and efficiency of the diesel engine operation under partial load and low-speed crankshaft rotation.

© Габдрафиков Ф.З., Галиакберов У.С.