

УДК 621.43.

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВПРЫСКИВАНИЯ

А. В. Неговора¹, Р. Ж. Магафуров¹, Е. П. Парлюк²

¹ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»

(г. Уфа, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

(г. Москва, Российская Федерация)

Аннотация: В данной статье доказана возможность управления фактическим давлением в трубопроводе разработанного авторами измерительного модуля при оценке характеристики впрыскивания, необходимо для расширения диапазона измеряемых цикловых подач. Наиболее значимыми факторами при этом являются температура и остаточное давление в трубопроводе.

Ключевые слова: испытание форсунок; характеристика впрыска; топливная аппаратура.

PRESSURE CONTROL METHOD WHEN EVALUATING THE CHARACTERISTICS OF THE INJECTION

A. V. Negovora^a, R. Zh. Magafurov^a, E. P. Parlyuk^b

^aBashkir State Agrarian University

(Ufa, Russian Federation)

^bRussian Timiryazev State Agrarian University

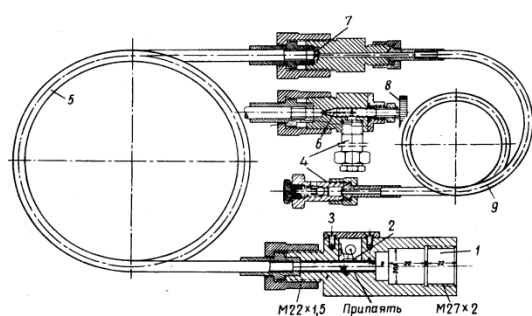
(Moscow, Russian Federation)

Abstract: This article proves the possibility of controlling the actual pressure in the pipeline of the measuring module developed by the authors when evaluating the injection characteristics necessary to expand the range of measured cyclic feeds. The most significant factors are the temperature and residual pressure in the pipeline

Keywords: test injectors; injection characteristics; fuel and equipment.

Жесткие требования по выполнению норм токсичности отработавших газов двигателей автотракторной техники заставляет конструкторов совершенствовать не только конструкцию топливной аппаратуры, но и приборы, а также технологии контроля ее технического состояния в эксплуатации. Одним из наиболее информативных диагностических параметров работы системы питания является характеристика впрыскивания топлива форсункой. Однако в широком использовании данный показатель не контролируется вследствие сложности оборудования и определенной квалификации диагноста. В этой связи актуальным становится вопрос разработки стенда и технологии оценки фактической характеристики топливоподачи на соответствие эталонной кривой в процессе эксплуатации и после ремонта отдельных компонентов системы питания[1].

На кафедре Автомобили и машинно-тракторные комплексы ведутся научно-исследовательские работы по разработке стенда для испытания компонентов топливных систем с возможностью оценки характеристики впрыскивания. За основу был взят предложенный фирмой Bosch [2] метод определения характеристики топливоподачи путем впрыскивания в длинный трубопровод показанный на рисунке 1. Этот метод наиболее прост, не требует использования подвижных и прецизионных деталей, надежен, а главное имеет близкую к линейной пропорциональную зависимость расхода топлива через сопла распылителя от регистрируемого давления.



а)



б)

Рисунок 1 – Устройства для оценки характеристики впрыскивания: а) R. Bosch (Германия), б) R. Bosch(Германия)

Разработанный нами измерительный модуль (рисунок 2) состоит из длинного трубопровода 8 определенной длины с датчиком температуры 7, адаптера впрыска 6 с тензометрическим датчиком давления, ресивера 10 с устройством регулировки остаточного давления 11, блока обработки сигналов 9 на основе программно логической интегральной схемы (ПЛИС) и управляющего оборудования 1 с гидродинамической системой для создания высокого давления и управления форсункой и датчиком тока управляющего сигнала форсунки.

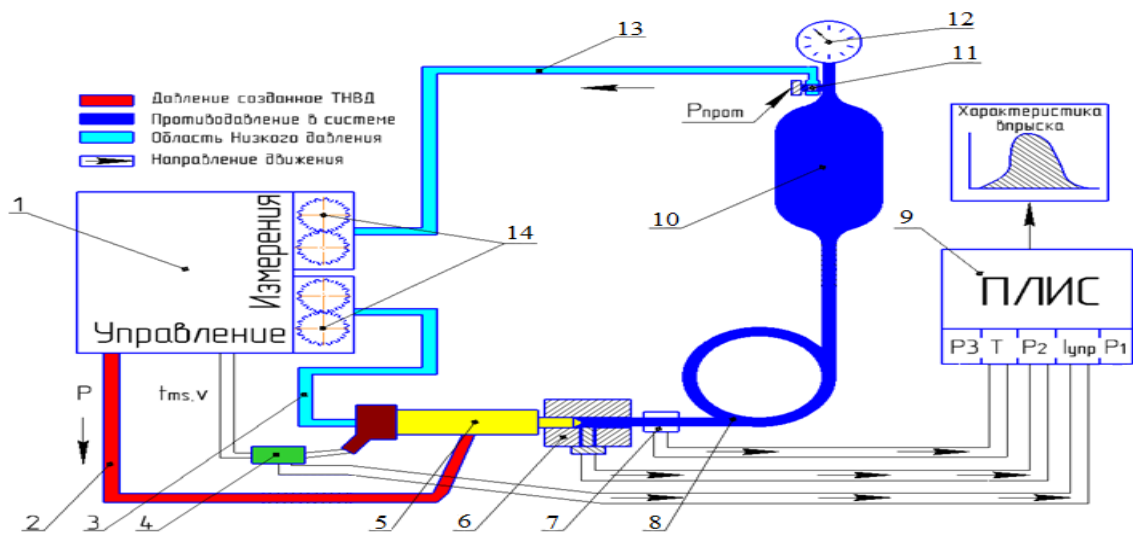


Рисунок 2 – Принципиальная схема разработанного измерительного модуля:

1 – управляющее оборудование; 2 – топливопровод высокого давления; 3 – топливопровод обратного слива; 4 – датчик тока управляющего сигнала форсунки; 5 – испытываемая форсунка; 6 – адаптер впрыска с датчиком давления; 7 – датчик температуры; 8 – трубопровод; 9 – программно-логическая интегральная схема; 10 – ресивер; 11 – клапан противодавления впрыску топлива; 12 – манометр; 13 – трубопровод низкого давления; 14 – расходомеры.

Для расширения диапазона измеряемых цикловых подач на разработанном измерительном модуле предусмотрена возможность изменения температуры тестовой жидкости и остаточного давления в трубопроводе с поддержанием заданного противодавления среды при впрыскивании топлива. Устройство 11 регулировки остаточного давления [3] одной стороной соединено с ресивером, на другой стороне установлен клапан грибка-

вого типа, нагруженный пружиной. Усилие пружины и ход клапана могут изменяться вращением регулировочных винтов и для изменения противодействия в ресивере, измерительном трубопроводе и камере впрыска. Клапан имеет резьбовое отверстие для установки манометра визуального контроля давления.

Использование разработанного измерительного модуля осложняется тем, что при испытании форсунки ее цикловая подача изменяется в широком диапазоне: от 1 мм³ до 150 мм³ и выше. Это вызывает большие колебания давления в трубопроводе и, соответственно, повышает требования как к датчику давления, так и к самому трубопроводу. Допустимый диапазон измеряемых подач, как и точность оценки характеристики впрыскивания, можно увеличить, управляя мгновенным давлением в трубопровод через совокупность конструктивно-режимных параметров измерительного модуля: диаметра и длины трубопровода, физических свойств рабочей жидкости, остаточного давления в трубопроводе и др. Наиболее просто это делать путем воздействия на систему управляющими факторами, которыми в нашем случае являются величина остаточного давления в трубопроводе и физические свойства тестовой жидкости. Если этого недостаточно, то возврат текущего давления в трубопроводе в допустимый для измерения диапазон возможен путем изменения корректирующих факторов, т.е. должна быть изменена конструкция измерительного модуля.

Для формирования алгоритма и закона воздействия управляющих факторов на систему были проведены расчетно-численные исследования с помощью математической модели на основе гидродинамического расчета процессов в разработанном измерительном модуле.

Математическая модель измерительного модуля базируется на решении уравнений движения и неразрывности нестационарного изотермичного течения вязкой сжимаемой жидкости в трубопроводе, пренебрегая кариолисовыми и гравитационными силами [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} [\rho f U] + \frac{\partial}{\partial x} [\rho f U^2] + f \frac{\partial P}{\partial x} = -K \cdot U; \\ \frac{\partial}{\partial t} [\rho f] + \frac{\partial}{\partial x} [\rho f U] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где t – время, с; x – продольная координата, м; f – площадь поперечного сечения трубки, м²; U – скорость, м/с; P – давление, Па; ρ – плотность, кг/м³; K – диссипативный множитель, кг/м·с.

Решение, которое с учетом координаты начала трубопровода, когда $x = 0$, можно записать в форме Д’Аламбера:

$$\begin{cases} P_{x=0} = P_0 + F_{x=0} - W_{x=0}; \\ U_{x=0} = [F_{x=0} + W_{x=0}] / \alpha\rho \end{cases} \quad (2)$$

Конструктивно датчик давления в измерительном модуле находится в самом начале трубопровода, поэтому принимаем, что $P_{x=0} = P_1$. Кроме того, для нормальной работы модуля недопустимо, чтобы отраженные волны давления накладывались показания датчика, то есть необходимо, чтобы $W_{x=0} = 0$.

Учитывая эти требования система (2) запишется как:

$$\begin{cases} P_1 = P_0 + F_{x=0}; \\ U_{x=0} = (P_1 - P_0) / \alpha\rho \end{cases} \quad (3)$$

А характеристика впрыскивания будет определяться соотношением

$$Q(t) = \frac{f \cdot (P(t) - P_{\text{ост}})}{\alpha \cdot \rho} \quad (4)$$

Тогда текущее давление в адаптере впрыска можно представить как

$$P(t) = Q(t) \frac{\alpha \cdot \rho}{f} + P_{\text{ост}} \quad (5)$$

Из формулы видно, что давление в трубопроводе прямо пропорционально объемной цикловой подаче с учетом остаточного давления в трубопроводе, скорости распространения волны давления и плотности топлива и обратно пропорционально площади поперечного сечения трубопровода. Так как диаметр трубопровода в нашем случае не меняется, а остаточное давление является установочным параметром, то при заданной цикловой подаче давление в адаптере впрыска будет зависеть только от скорости звука и плотности.

Проанализируем влияние температуры тестовой жидкости и остаточного давления в трубопроводе на скорость распространения волны давления в трубопроводе. Исходя из определения α_∞ в бесконечной среде [4] скорость распространения волны давления можно оценить как

$$\alpha_{\infty} = \sqrt{\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_{S=const}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta}}, \quad (6)$$

где β – коэффициент сжимаемости среды, Па⁻¹.

Для решения выражения 5 необходимо вычисление текущей плотности и истинной скорости распространения волны давления в трубопроводе. Для расчетов можно применить уравнение связи двух важных для нас параметров: $\rho = f(P)$ и $t = f(P)$, аналогичное использованному в работе [5]:

$$\left(\frac{\rho}{\rho_{0t}}\right)^{\varkappa} = \frac{B + P_{ocm}}{B}. \quad (7)$$

И далее

$$\rho = \rho_{0t} \cdot \sqrt[\varkappa]{\frac{B + P_{ocm}}{B}} \quad (8)$$

Здесь ρ_{0t} – плотность при температуре t и атмосферном давлении, которую можно вычислить через ρ_{20} – плотность при нормальных условиях:

$$\rho_{0t} = \rho_{20} - (1,8 - 0,0013 \cdot \rho_{20}) \cdot (t - 20) \quad (9)$$

Аналогично можно вывести формулу для коэффициента сжимаемости:

$$\beta = \frac{1}{\varkappa B} \cdot \left(\frac{P + B}{B}\right)^{\frac{1-\varkappa}{\varkappa}}; \quad (10)$$

И далее с учетом выражения (5):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\varkappa}{\rho_0} B^{\frac{1}{\varkappa}} (P + B)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}} \quad (11)$$

Таким образом, мы можем представить выражение (5) в следующем виде, пригодном для анализа

$$P = \frac{Q \cdot \rho_{0t}}{f} \cdot \sqrt[\varkappa]{\frac{B + P_{ocm}}{B}} \cdot \sqrt{\frac{\varkappa}{\rho_0} B^{\frac{1}{\varkappa}} (P_{ocm} + B)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}} + P_{ост} \quad (12)$$

Константы B и \varkappa принимаются из эмпирических зависимостей, определенных для конкретной рабочей жидкости. Например, для дизельного топлива, наиболее близкого по свойствам к тестовой жидкости, приняты значения:

$$\left. \begin{aligned} B &= 10^6 [222,3 - 1,26 \cdot (t - 20) + 0,62(\rho_{20} - 825)] \\ \varkappa &= 7,49 + 0,0086 \cdot (t - 20) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Таким образом, можно констатировать, что мгновенное давление у датчика при заданном диаметре трубопровода прямо

пропорционально объему тестовой жидкости, проходящей мимо датчика в единицу времени и обратно пропорционально диаметру трубопровода. Другими значимыми параметрами системы являются температура и остаточное давление в трубопроводе, влияние которых на выходные показатели неоднозначно и не имеет явно выраженной закономерности. Тем не менее, уравнение (12) показывает, что изменение температуры и остаточного давления в трубопроводе явно влияет на давление в адаптере впрыска, а значит предложенная нами гипотеза о возможности управления давлением в трубопроводе при оценке характеристики впрыскивания является рабочей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Неговора А. В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных дизелей совершенствованием конструкции и технологии диагностирования топливоподающей системы : дисс. ... докт. техн. наук : 05.04.02 / Неговора Андрей Владимирович. Санкт-Петербург, 2004. 340 с.

2 Bosch Wilhelm. Der Einspritzgesetz-indikator, ein neues Meßgerät zur direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Einzeleinspritzungen // Motortech, 1964, № 7, стр. 268-282.

3 Пат. № 179689 Российская Федерация, МПК F02M 35/00. Устройство противодействия впрыску топлива / Сафин Ф. Р., Баширов Р. М., Магафуров Р. Ж., Юльбердин Р. Р.; Патентообладатель Сафин Ф. Р. № 2017132750 ; заявл. 19.09.2017, опубл. 22.05.2018, Бюл. № 15.

4 Грехов Л. В. Программный комплекс ВПРЫСК: Версия – 3.3. Описание применения. Математическая модель подачи топлива. Описание пользовательского интерфейса. Москва, 2002.

5 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учебное пособие; В 10 т. Т. VI – Гидродинамика. М. : Наука. 1986. 736 с.

REFERENCES

1. Negovora A. V. Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazatelei avtotraktornykh dizelei sovershenstvovaniem konstruksii i tekhnologii diagnostirovaniia toplivopodaiushchei sistemy [Improved performance of diesel engines by improving the design and diagnostic technology of the fuel supply system]. Doctor's degree dissertation. Saint-Petersburg, 2004. 340 p.

2. Bosch Wilhelm. Der Einspritzgesetz-indikator, ein neues Meßgerät zur direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Ein-zeleinspritzungen [The injection

law indicator, a new measuring device for the direct determination of the injection law of individual injections]. *Motortech*, 1964, no. 7, pp. 268-282.

3. Safin F. R., Bashirov R. M., Magafurov R. Zh., Yulberdin R. R. Patent 179689 Russian Federation. Ustroistvo protivodavleniia vprysku topliva [Fuel injection backpressure device]. No. 2017132750 appl. 19.09.2017; publ. 22.05.2018. Bulletin No 15.

4. Grekhov L. V. Programmnyi kompleks VPRYSK: Versiia – 3.3. Opisaniie primeneniia. Matematicheskaiia model' podachi topliva. Opisaniie pol'zovatel'skogo interfeisa [VPRYSK software package: Version - 3.3. Application description. Mathematical model of fuel supply. User Interface Description]. Moscow, 2002.

5. Landau L. D., Lifshits E. M. Teoreticheskaiia fizika [Theoretical Physics]. Vol. VI – Hydrodynamics, Moscow, Science, 1986, 736 p.

Об авторах:

Неговора Андрей Владимирович, профессор кафедры «Автомобили и машинно-тракторных комплексы» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34), доктор технических наук, профессор, negovora@bsau.ru.

Магафуров Руслан Жамилевич, старший преподаватель кафедры «Автомобили и машинно-тракторных комплексы» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34), magafuroffruslan@yandex.ru.

Парлюк Екатерина Петровна, доцент кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), кандидат экономических наук, доцент, kparlyuk@rgau-msha.ru.

About the authors:

Andrey V. Negovora, Professor of the Department «Automobiles and Machine-Tractor Complexes», Bashkir State Agrarian University (450001, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Fiftieth anniversary of October, 34), D.Sc. (Engineering), professor, negovora@bsau.ru.

Ruslan Zh. Magafurov, senior lecturer of the department «Automobiles and machine-tractor complexes», Bashkir State Agrarian University (450001, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Fiftieth anniversary of October, 34), magafuroffruslan@yandex.ru.

Ekaterina P. Parlyuk, associate professor of the Department of Tractors and Automobiles, Russian Timiryazev State Agrarian University (127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49), Cand.Sc. (Economic), associate professor, kparlyuk@rgau-msha.ru.