

УДК 621.436.038

*А.Н. Врублевский, канд. техн. наук, А.В. Грицюк, канд. техн. наук,
Г.А. Щербаков, инж., А.В. Денисов, асп.*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРСУНКИ ДЛЯ ДВУХФАЗНОГО ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА В ЦИЛИНДР ВЫСОКООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

Введение

В автотракторных дизелях с непосредственным впрыскиванием, отличающихся наибольшей экономичностью, основной проблемой является уменьшение выбросов NO_x и твердых частиц. Эффективным методом снижения эмиссии твердых частиц без увеличения выхода NO_x является организация двухфазной подачи топлива. Данный метод применяется в дизелях фирм Mercedes-Benz, Ford, Fiat, Caterpillar и др. [1 - 3]. Наибольшие возможности по организации двухфазной топливоподачи имеют системы с электронным управлением аккумулирующего типа [1]. Однако и в традиционных топливных системах с кулачковым приводом плунжерной пары насосной секции возможно получить двухфазное впрыскивание топлива в цилиндр дизеля.

Анализ публикаций

Так, например, разработанная фирмой Bosch насос-форсунка рис. 1 обеспечивает наряду с основной подачей, подачу предварительной порции топлива в цилиндр дизельного двигателя. Подача предварительной пилотной порции топлива обеспечивается при помощи золотника 3. На начальном этапе активного хода плунжера 1 насосной секции происходит первый подъем иглы 5. При этом золотник 3 находится в верхнем положении, т. к. площадь золотника на которую действует давление топлива меньше площади иглы 5. Продолжающийся рост давления топлива в камере 2 приводит к перемещению золотника 3 и дополнительному сжатию пружины 4. Сила натяжки пружины 4 увеличивается, что вызывает перемещение иглы 5 в сторону запорного конуса и закрытию распыливающих отверстий 7.

Давление топлива в кармане 6 распылителя продолжает увеличиваться - происходит второй подъем иглы и впрыскивание в цилиндр основной порции топлива. После отсечки игла форсунки садится на запорный конус и процесс топливоподачи завершается. С уменьшением давления в полости 2 золотник под действием пружины 4 перемещается в сторону насосной секции.

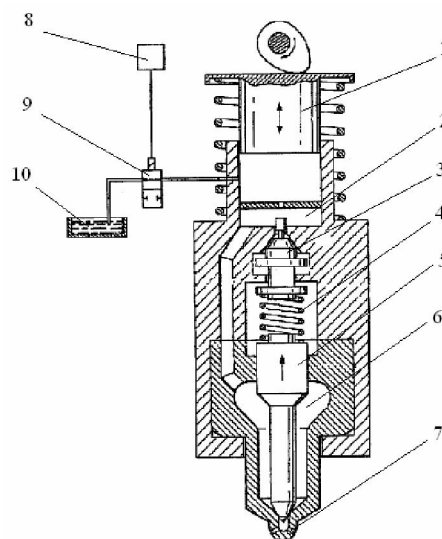


Рис. 1. Схема насос-форсунки с управляющим клапаном фирмы Bosch [4]:

1 - плунжер, 2 - камера управления, 3 - золотник, 4 - пружина, 5 - игла, 6 - карман распылителя, 7 - распыливающие отверстия, 8 - блок управления, 9 - электроуправляемый клапан, 10 - топливный бак

Цель и постановка задачи

Цель данной работы – предложить и исследовать техническое решение, направленное на улучшение показателей работы топливной системы непосредственного действия высокооборотного отечественного дизеля, а именно на организацию двухфазного впрыскивания топлива.

Объект исследования – форсунка с дифференциальным поршнем

Для организации двухфазного впрыскивания в разделенной топливной системе (ТС) непосредственного действия в КП ХКБД (г. Харьков) совместно с кафедрой ДВС ХНАДУ разработана и исследована форсунка закрытого типа с дополнительным дифференциальным поршнем рис. 2.

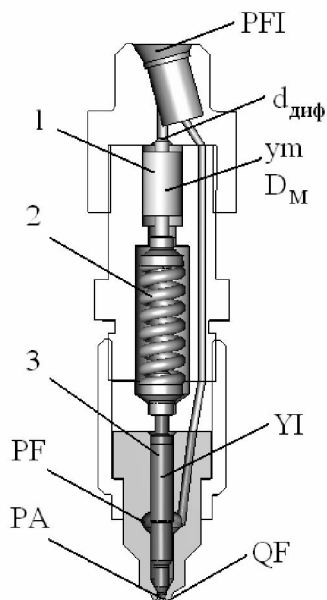


Рис. 2. Форсунка для двухфазного впрыскивания топлива:

1 – поршень, 2 – пружина, 3 – игла

Конструктивной особенностью данной форсунки является использование одной пружины 2 для запираания иглы 3 и дифференциального поршня 1. Такое решение позволяет упростить форсунку и сделать ее компактной, а также исключить необходимость отвода утечек топлива по прецизионным зазорам поршня и иглы.

Двухфазное впрыскивание топлива в ТС с предложенной форсункой организовано следующим образом. В начале активного хода плунжера ТНВД давление топлива P_F в кармане распылителя увеличивается до значения, превосходящего давление $P_{\Phi 0}$ начала хода y_I иглы. Это приводит к подъему иглы 3 и началу впрыскивания топлива. Перемещение y_m поршня 1 должно начинаться после момента начала

впрыскивания. Достигается это выбором величины $d_{\text{диф}}$ дифференциальной площадки поршня. Следовательно, давление P_{M0} начала перемещения поршня больше значения $P_{\Phi 0}$. Перемещение поршня 1 приводит к дальнейшему сжатию пружины 2 и отводу топлива в поршневую полость. Вследствие этого давление P_F понижается, а $P_{\Phi 0}$ увеличивается. Под действием данных факторов игла перемещается и перекрывает отверстия распылителя форсунки. Давление P_A в колдце распылителя в данный момент равно нулю. Продолжение нагнетания топлива плунжером ТНВД приводит к дальнейшему росту давления P_F и повторному подъему иглы 3. За время второго подъема иглы происходит подача в цилиндр дизеля основной части цикловой порции топлива. Понижение давления P_F , связанное с открытием сливного отверстия в втулке плунжера ТНВД приводит к перемещению иглы в сторону запорного конуса и завершению процесса впрыскивания топлива. Быстрому перемещению иглы и исключению подвпрыскиваний способствует высокое значение $P_{\Phi 0}$, а также давление топлива, перетекающего в пружинную полость по прецизионным зазорам иглы и поршня.

Обратный ход поршня 1 происходит после запираания иглы. Топливо из поршневой полости уходит в сторону ТНВД и не влияет на завершение процесса впрыскивания.

Проведенные безмоторные испытания (см. табл. 1) подтвердили эффективность предложенного способа для организации двухфазного впрыскивания в ТС непосредственного действия. При этом конструктивные и регулировочные параметры форсунки были следующими: максимальные ход иглы $y_I = 0,3$ мм и поршня $y_m = 0,5$ мм; диаметр D_M поршня 5 мм; диаметр $d_{\text{диф}}$ дифференциальной площадки 2,7 мм; $P_{M0} = 29$ МПа, $P_{\Phi 0} = 18$ МПа; топливо из объема полости пружины отводится в топливный бак.

Таблица 1. Результаты расчетного и экспериментального исследования ТС с форсункой (рис. 2)

Частота вращения кулачкового вала, мин ⁻¹	Цикловая подача топлива, мм ³	Давление РА, МПа		Продолжительность впрыскивания, град. кул. вал		Доля цикловой в предварительном впрыскивании (эксп.), %
		расчет	эксп.	расчет	эксп.	
1800	46	52	53,1	17	17,3	20
1800	33	47	52,5	13,5	14	35
1800	19	21	19,4	11	10	60
1500	48	48	45	15	15,5	20
1500	33	46	42,5	11	12	20
1500	22	22	21,3	10	10,4	48
1000	40	28	25	9,5	10,8	65
1000	20	15	17,5	7	7,2	впрыск однофазн
1000	10	16	16,8	4	3,2	впрыск однофазн
400	8,6	3	3	2,5	1,7	впрыск однофазн

Вместе с тем, был выявлены существенные недостатки данного способа, а именно. Достижимые значения максимального давления впрыскивания РА не превышают уровня 53 МПа; на режимах, требующих подачи малых доз топлива (10 – 8 мм³) впрыскивание носит однофазный характер; доля топлива подаваемого в первую фазу составляет 20 – 65 % от суммарной.

С целью определения возможных путей улучшения характеристик впрыскивания в ТС с предлагаемой форсункой проведено моделирование работы данной ТС и серия численных экспериментов.

Результаты расчетно-экспериментального исследования

На первом этапе расчетного исследования проведена проверка на адекватность разработанной математической модели. Результаты данной работы представлены в табл. 1 и свидетельствуют о хорошей сходимости результатов расчета с экспериментальными данными (не менее 90 %).

Результаты моделирования работы форсунки с дополнительным поршнем подтвердили предположение о том, что максимальные значения давления впрыскивания на номинальном режиме - 100 МПа (рис. 3) достигаются при конструкции поршня 1 без дифференциальной площадки, т. е. относительный диаметр дифференциальной площадки равен

$$\overline{D} = \frac{d_{\text{диф}}}{D_M} = 1.$$

Однако в данном варианте не реализуется двухфазное впрыскивание, а высокие давления являются следствием использования происходящих в топливопроводе волновых явлений.

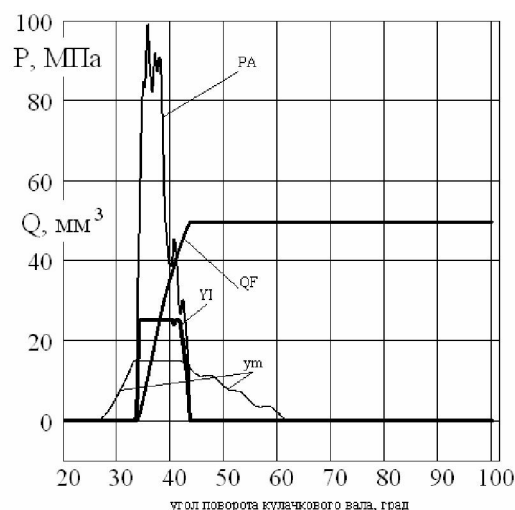


Рис. 3. Расчетные кривые изменения давления РА, хода поршня ут и иглы УІ форсунки.

Компромиссным по получаемым значениям давления впрыскивания и возможности организации двухфазной топливоподдачи следует считать форсунку со следующими конструктивными и регулировочными параметрами: максимальные ход иглы УІ = 0,3 мм и поршня ут = 0,5 мм; $D_M = 6$ мм; $d_{\text{диф}} = 2,5$ мм; $P_{MO} = 33$ МПа, $P_{\text{фо}} = 21$ МПа; объем

полости пружины – 775 мм^3 .

В данной форсунке используются волновые явления в топливопроводе и, в то же время, принципы работы, изложенные выше.

Данные значения получены в ходе теоретического исследования ТС. В таблице 2 представлены результаты данного исследования. На рис. 4 – 6 при-

ведены зависимости, позволившие выбрать рациональные параметры форсунки для двухфазного впрыскивания топлива для режиме работы дизеля $n_{\text{кул.вал}} = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $q_{\text{ц}} = 20 \text{ мм}^3$. Аналогичные кривые получены для других характерных режимов (см. табл. 2) работы данного дизеля.

Таблица 2. Расчетные характеристики впрыскивания ТС с оптимальными параметрами форсунки

Частота вращения кулачкового вала, мин^{-1}	Цикловая подача топлива, мм^3	Давление РА, МПа	Продолжительность основного впрыскивания, град. кул. вал	Доля цикловой в предварительном впрыскивании, мм^3
1800	46	83	9	2
1800	33	81	6	2
1800	19	67	5	5
1500	48	69	9	3
1500	33	68	6	3
1500	22	60	4,5	3
1000	40	45	7	3
1000	20	43	3,5	2
1000	10	26	2	2,5
400	8,6	6	1,7	4

Полученные на рис. 4 зависимости показывают, что определяющим параметрами для двухфазной подачи являются диаметры поршня D_M и его дифференциальной площадки $d_{\text{диф}}$. При фиксированном значении данных диаметров уровень максимального давления в колодце распылителя РА можно задавать давлением $P_{\text{фо}}$ предварительной затяжки пружины форсунки (рис. 5) и величиной u_m (рис. 6).

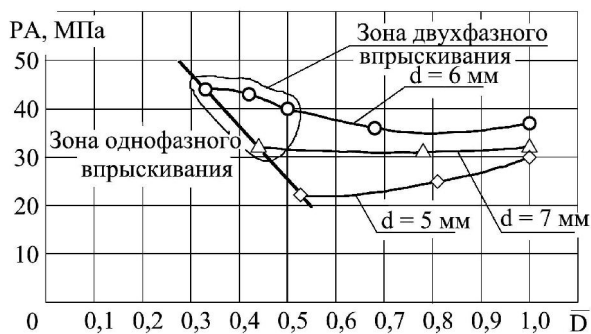


Рис. 4. Зависимость давления РА от диаметра поршня и параметра $\bar{D}$.

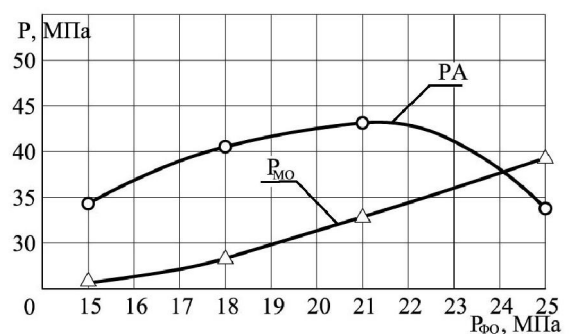


Рис. 5. Зависимость давлений РА и $P_{\text{МО}}$ от давления $P_{\text{фо}}$.

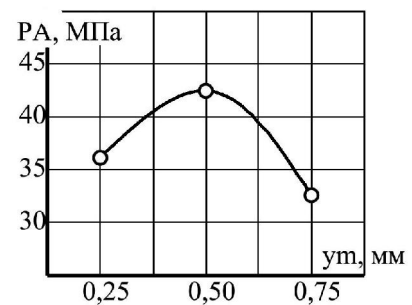


Рис. 6. Зависимость давления РА от величины u_m максимального хода поршня ($D_M = 6 \text{ мм}$; $d_{\text{диф}} = 2,5 \text{ мм}$).

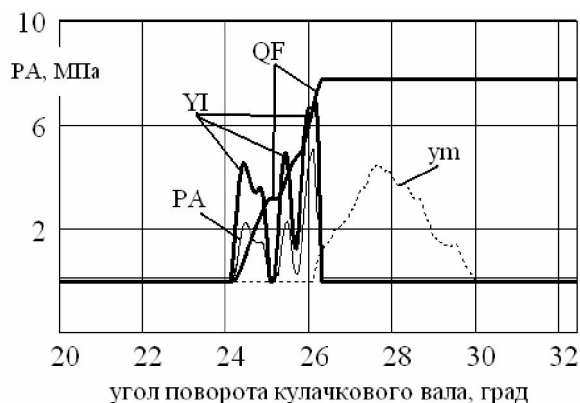


Рис. 7. Расчетные кривые изменения давления PA, хода поршня um и угла YI форсунки на режиме холостого хода дизеля.

Приведенные на рис. 7 расчетные кривые свидетельствуют о том, что на одном из самых важных при эксплуатации автотракторного дизеля режимов — холостом ходу — предложенная конструкция форсунки обеспечивает двухфазную подачу топлива с общей продолжительностью 2,1 градуса поворота кулачкового вала.

Выводы

В топливной системе непосредственного действия высокооборотного дизеля за счет включения в конструкцию форсунки дифференциального поршня возможно организовать двухфазное впрыскивание топлива на всех рабочих режимах.

Разработана математическая модель работы топливной системы с форсункой с дифференциальным поршнем. Доказана адекватность математической

модели — различие характеристик впрыскивания полученных расчетом и в ходе эксперимента не превышает 10 %.

С помощью математического моделирования определены оптимальные конструктивные и регулировочные параметры форсунки, которые обеспечивают двухфазную подачу топлива (доля цикловой в предварительном впрыскивании $2 - 5 \text{ мм}^3$) при давлении впрыскивания от 6 МПа на режиме холостого хода до 83 МПа на номинальном режиме.

Список литературы:

1. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. - М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. — 480 с.
2. Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков / А.Д. Блинов, П.А. Голубев, Ю.Е. Драган и др. Под ред. В.С. Папонова и А.М. Минеева. — М.: НИИЦ "Инженер", 2000. 332с.
3. Klingmann V.R., Bruggemann H. Der neue Vierzylinder-Dieselmotor OM611 mit Common-Rail-Einspritzung. Teil1: Motor-konstruktion und mechanischer Aufbau // MTZ: Motor-technische Zeitschrift. — 1997. — 58. — № 11. — S. 652-659.
4. Fuel injection system for an internal combustion engine, US Patent 6889661, Duplat, Gérard, Pourret; Raphael, Voigt; Robert Bosch GmbH, F02M 037/04.