

УДК 621.436.658.589

ФОРСУНКА С ДВУМЯ УРОВНЯМИ ОТВЕРСТИЙ

Ю.Д. Погуляев, д.т.н., проф., Р.М. Байтимеров, асп. / Южно-Уральский государственный университет
В.Н. Наумов, д.т.н., проф., Д.А. Чижев, к.т.н., доц. / МГТУ им. Н.Э. Баумана

Данная система представляет собой насос-форсунку с независимым управлением давлением и иглой. Кулачок привода насоса-форсунки выполнен так, чтобы скорость опускания плунжера была постоянной. Благодаря этому давление в камере высокого давления насоса-форсунки может быть постоянным. Величина этого давления устанавливается с помощью пьезоэлектрического клапана регулирования давления (КРД). КРД соединяет камеру высокого давления насоса-форсунки с магистралью подвода топлива. Проходное сечение клапана регулирования давления зависит от величины напряжения, подаваемого на пьезоэлектрический актуатор. Таким образом, при изменении напряжения на пьезоэлементе изменяется давление в камере высокого давления. Игла насоса-форсунки управляется гидравлически с помощью двухпозиционного клапана. Привод клапана может быть соленоидным, пьезоэлектрическим или механическим.

Разработана математическая модель впрыска топлива этим насосом-форсункой. На основе этой математической модели рассчитаны характеристики топливоподачи для многофазного впрыска, состоящего из одного предварительного, основного и одного впрыска после основного. Расчёт проводился для режимов, отличающихся формой основного впрыска: ступенчатого, трапециевидного, треугольного и прямоугольного. Показано, что предложенная система топливоподачи позволяет реализовать все четыре формы основного впрыска, а также устанавливать давление для предварительного впрыска и впрыска после основного. Рассматриваемая ТПС является перспективной, однако нуждается в дальнейшем изучении.

В настоящее время ведущие производители дизельных двигателей внутреннего сгорания вынуждены решать сложные и зачастую противоречивые задачи. Одной из таких задач является необходимость осуществления мультивпрыска для улучшения экологических и технических характеристик двигателя [1, 2].

Самые совершенные на данный момент системы топливоподачи (ТПС) — аккумуляторные системы непосредственного впрыска типа Common Rail с электрогидравлическими или пьезоэлектрическими форсунками — могут впрыскивать до девяти порций топлива за один цикл [3]. При этом объёмы этих

порций могут различаться на два порядка. Так, объём пилотного впрыска может составлять 1 мм^3 и менее, а объём основной порции — 100 мм^3 и более [4].

Объём впрыскиваемого топлива регулируется длительностью или давлением впрыска, поскольку впрыскивание всех порций топлива осуществляется через один уровень отверстий. Выбор диаметров отверстий при этом затруднителен.

При относительно большом диаметре отверстий очень сложно дозировать малые объёмы. Электрогидравлическое управление клапанами форсунок не справляется с этой операцией, так как не открывшийся до конца вследствие электромагнитных переходных процессов клапан необходимо закрывать для точного дозирования порции топлива. В этот период времени клапан управлению не поддаётся.

При относительно малом диаметре отверстий гораздо сложнее реализовать основной впрыск по объёму подаваемого топлива. Для этого нужно затягивать основной впрыск и выходить за границы оптимального впрыска по условиям экологии или повышать давление впрыска. Повышение давления впрыска также ограничено утечками и технологическими возможностями при изготовлении форсунок [5].

Таким образом, имеется ряд технических противоречий, неразрешимых при использовании форсунок с одним уровнем отверстий. В частности, в форсун-

ках с одним уровнем отверстий сложно осуществить точное дозирование каждой порции топлива при большой разнице их объёмов.

Применение форсунки с двумя и более уровнями отверстий [5–9] позволяет разрешить основные противоречия. При этом нужно отметить, что форсунки с двумя уровнями отверстий до сих пор не выпускаются из-за проблем с приводом клапанов и ряда технологических моментов.

Во всяком случае, реализация соленоидного привода или пьезопривода для двухуровневых форсунок весьма проблематична. Поэтому предлагаются новые технические решения по двухуровневым форсункам с механическим приводом управляющих клапанов.

В данной статье рассматривается форсунка с двумя уровнями отверстий для ТПС типа Common Rail. На наш взгляд, она может быть реализована без особых технических сложностей и способна разрешить противоречия, упомянутые выше.

Чтобы продемонстрировать это, был проведён гидродинамический расчёт впрыска топлива рассматриваемой форсункой согласно методике, изложенной в [11, 12], при этом принято допущение: первый и второй уровни отверстий гидравлически изолированы друг от друга. Расчётная схема форсунки представлена на рис. 1.

Впрыск разбит на три порции: пилотный впрыск, реализуемый до основного, основной впрыск и дожигающий впрыск, реализуемый после основного.

Пилотный и дожигающий впрыски реализуются через первый уровень отверстий с малым эффективным проходным сечением, малой длительностью впрыска и служат для подачи небольшого объёма топлива.

Основной впрыск реализуется между пилотным и дожигающим впрысками через отверстия второго уровня с гораздо большим эффективным сечением и со значительно большей длительностью впрыска. Такковы требования, предъявляемые к оптимальному впрыску.

В качестве приводов ДПК-1 и ДПК-2 применяются быстродействующие реверсивные механические приводы. Длительность управляющего воздействия для коротких впрысков выбрана как минимально возможная для такого привода при частоте вращения вала управляющего кулачка 1 500 оборотов в минуту — 0,1 мс [12].

Длительность управляющего воздействия для основного впрыска выбрана на порядок больше и равна 1 мс. Эффективное проходное сечение для отверстий первого уровня $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$. Эффективное проходное сечение для отверстий второго уровня более чем в пять раз больше — $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$. Для сравнения

также были рассчитаны ТПС с форсункой с одним уровнем отверстий в двух вариантах: с $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$ и $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$.

На рис. 2 представлены дифференциальные характеристики расхода топлива через распыляющие отверстия и на управление для всех трёх форсунок.

Получены следующие результаты. Отношение объёма основного впрыска к пилотному для двухуровневой форсунки $k = 49,4$, и это есть прямое следствие новой конструкции. Отношение объёма основного впрыска к пилотному для одноуровневой форсунки с $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$ — $k = 12,8$. Отношение объёма основного впрыска к пилотному для одноуровневой форсунки с $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$ — $k = 12$.

На рис. 2, а видно, что расход топлива на управление для пилотного впрыска составляет 5 мм³, что в два раза меньше расхода топлива на управление для основного впрыска. В то же самое время расход топлива на управление для пилотного впрыска в случае одноуровневых форсунок (рис. 2, б и 2, в) сопоставим с расходом топлива на управление для основного впрыска.

Это объясняется особенностью работы двухпозиционного клапана: расход топлива через двухпозиционный клапан (на управление) будет только при нахождении клапана в промежуточных положениях (если не учитывать утечки через уплотнения), то есть только во время переключения из одного крайнего положения в другое [13]. Поскольку в случае одноуровневой форсунки управление всеми впрысками осуществляется исключительно с помощью одного

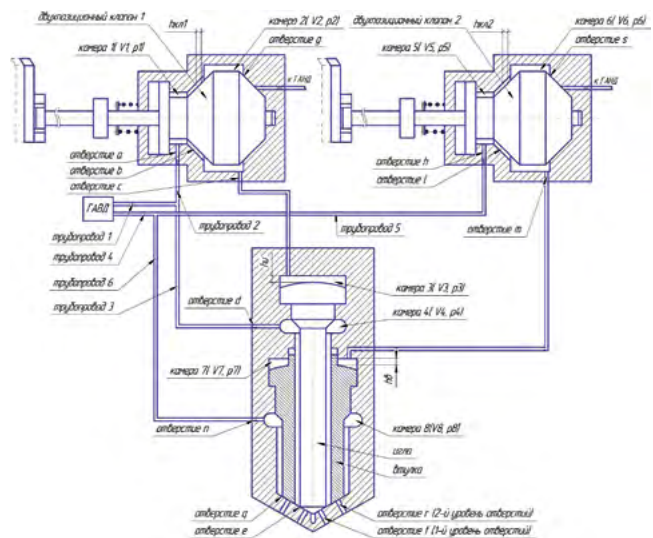
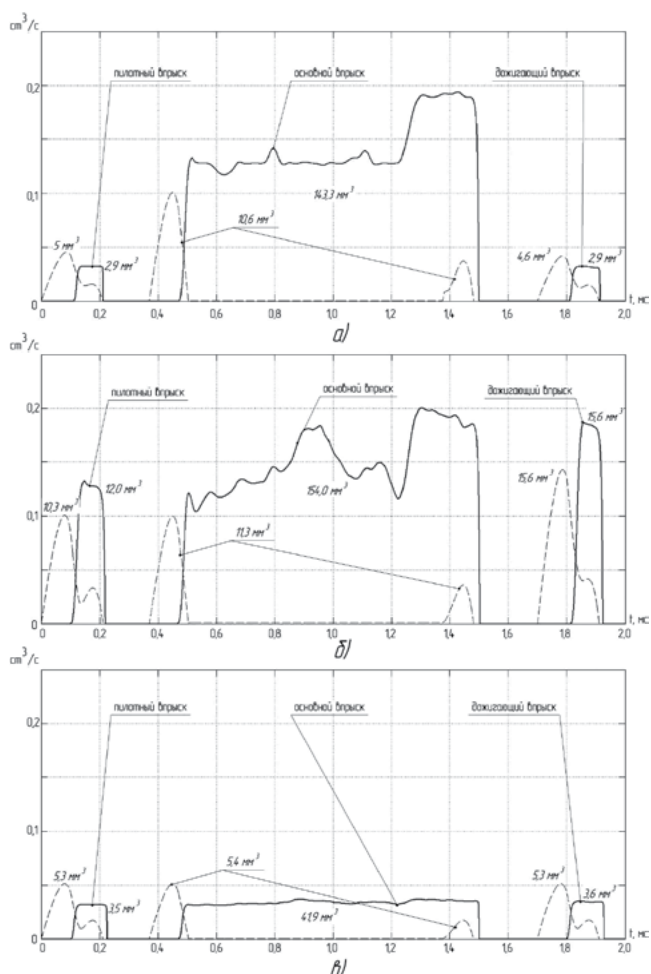


Рисунок 1. Расчётная схема форсунки (ГВД - гидроаккумулятор высокого давления; $V_i p_i$ — соответственно объём и давление в i -ой камере; $h_a, h_b, h_{кл1}, h_{кл2}$ — максимальные ходы соответственно иглы, втулки, двухпозиционного клапана 1,2 (ДПК1, ДПК2))



(Уисунок 2. Расчетная дифференциальная характеристика впрыскивания (—) и расхода топлива на управление (- - -): а) двухуровневая; б) одноуровневая с $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$; в) одноуровневая с $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$

ДПК, расходы топлива на управление для всех впрысков по объёму сопоставимы.

В случае же двухуровневой форсунки мы имеем два ДПК. ДПК для первого уровня отверстий можно сделать меньше без существенного снижения динамики иглы, поскольку очевидно, что игла легче, чем втулка. Таким образом, можно оптимизировать расход топлива на управление для каждого уровня отверстий.

Согласно характеристикам на рис. 2, двухуровневая форсунка обладает очевидными и неоспоримыми преимуществами перед одноуровневыми при осуществлении мультивпрыска. При этом большим недостатком двухуровневой форсунки является значительное её усложнение по сравнению с одноуровневыми. Становится больше трубопроводов и деталей, форсунка более габаритная и требует наличия двух приводов — по одному на каждый уровень отверстий.

Однако это же самое обстоятельство значительно

расширяет возможности такой ТПС. Так, поскольку уровней отверстий два и они гидравлически изолированы друг от друга, впрыски через них происходят при разных давлениях.

Величины давлений под конусом иглы и втулки можно приблизительно вычислить из условия равенства расходов через распылители и сопловые отверстия [14]:

$$P_u = \frac{(\mu f)_{p1}^2}{(\mu f)_{отв1}^2} (P_4 - P_u) + P_u; P_v = \frac{(\mu f)_{p2}^2}{(\mu f)_{отв2}^2} (P_8 - P_u) + P_u$$

где ρ_u, ρ_v — давление под конусом иглы и втулки соответственно; $(\mu f)_{p1}, (\mu f)_{p2}$ — эффективные проходные сечения распылителей 1-го и 2-го уровней отверстий соответственно; $(\mu f)_{отв1}, (\mu f)_{отв2}$ — эффективные проходные сечения распыляющих отверстий 1-го и 2-го уровней соответственно; ρ_4, ρ_8 — давления в 4-й и 8-й камерах (рис. 1); P_u — давление газа в цилиндре двигателя.

Задачей любой ТПС является реализация оптимального цикла топливоподачи. Нужно подобрать такое давление, при котором дробление топлива будет оптимальным и даст нужную скорость горения. Дробление топлива до чрезмерно малых капель может увеличить скорость сгорания топлива, повысить температуру сгорания и, следовательно, увеличить концентрацию окислов азота в составе отработавших газов. То есть можно подобрать такие сечения отверстий, диаметры и ходы иглы и втулки, чтобы давления впрыска для каждого уровня были оптимальными.

На рис. 3 представлены расчётные диаграммы давлений впрыска топлива через первый и второй уровни отверстий двухуровневой форсунки с разными эффективными проходными сечениями отверстий первого уровня.

Как видно из рис. 3, при $(\mu f)_{отв1} = 0,07 \text{ мм}^2$ среднее давление впрыска через первый уровень отверстий — около 90 МПа, а при $(\mu f)_{отв1} = 0,2 \text{ мм}^2$ — уже около 70 МПа. Расчёт проводился при давлении в аккумуляторе высокого давления 100 МПа.

Таким образом, форсунка с двумя уровнями отверстий является более технологичной, экономичной и экологичной по сравнению с форсунками с одним уровнем отверстий, поскольку упрощает организацию мультивпрыска.

ВЫВОДЫ:

1. Разработана математическая модель впрыска топлива гидравлической форсункой с механическим управлением и двумя уровнями отверстий. Проведён расчёт мультивпрыска, состоящего из пилотного,

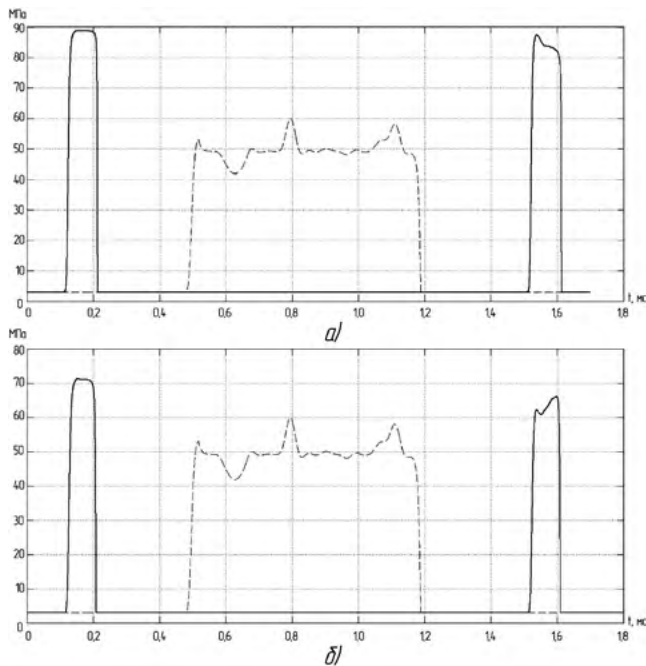


Рисунок 3. Диаграммы давлений впрыска для двухуровневой форсунки, первый уровень отверстий (—), второй уровень отверстий (---):
 а) $(\mu f)_{отв1} = 0,07 \text{ мм}^2$, $(\mu f)_{отв2} = 0,38 \text{ мм}^2$; б) $(\mu f)_{отв1} = 0,2 \text{ мм}^2$,
 $(\mu f)_{отв2} = 0,38 \text{ мм}^2$

основного и дожигающего впрысков. Определены основные параметры форсунки, обеспечивающие высокие технические показатели.

2. Показано, что двухуровневая форсунка значительно расширяет возможности топливоподающих систем, в частности:

- имеет место более точное дозирование пилотных и дожигающих впрысков при неизменных объемах основного впрыска;
- появляется возможность за счёт подбора соотношения сечений отверстий первого уровня, диаметра и хода иглы осуществлять пилотный впрыск при оптимальном давлении, отличном от давления основного впрыска;
- появляется возможность снижения расхода топлива на управление при уменьшении проходных сечений ДПК-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Mahr. B. Future and Potential of Diesel Injection Systems // THIESEL 2002 Conference on Thermo- and Fluid-Dynamic Processes in Diesel Engines. — 2002. — № 4 — С. 5–17.
2. Brahma A. Methodologies for Modeling and Feedback Control of the nox-bsfc trade-Off in High-Speed, Common Rail, Direct-Injection Diesel: Doctor Dissertation. — The Ohio State University. — 2005. — 236 p.
3. Delphi Multec® Light Duty Diesel Common Rail System // Официальный сайт компании Delphi Corporation [Электронный ресурс]. URL: <http://www.delphi.com/shared/pdf/ppd/dwtrn/multec-light-duty-diesel-common-rail-system.pdf> (дата обращения: 05.01.2013).
4. Богачёв С.А. Разработка топливоподающих систем дизеля нового поколения с целью выполнения перспективных нормативов, ограничивающих токсичность отработавших газов: дис. ... канд. техн. наук. — Ярославль. — 2002. — 173 с.
5. Сергеев В.М. Новый способ впрыскивания топлива в форсированных дизелях // Автомобильная промышленность. — 1998. — № 1. — С. 33–37.
6. Cooke M.P. Injection Nozzle: патент 7404526, США, F 02M 61/10 // Delphi Technologies, Inc., Troy, MI.
7. Haas S. Fuel Injection Nozzle: патент 2494294, Канада, F 02M 63/04 // MAN B&W Diesel.
8. Марченко А.П., Мешков Д.В., Рыкова И.В. Тенденции развития форсунок аккумуляторных топливных систем типа Common Rail // Двигатели внутреннего сгорания. — 2005. — № 1. — С. 68–74.
9. Burger L. Cam-controlled Injection Unit for Internal Combustion Engine: патент 100038054, Германия, F 02M 47/06 // AVL List GmbH, Graz, AT.
10. Погуляев Ю.Д., Наумов В.Н. Способ управления подачей топлива и устройство для его осуществления: патент 2383772, Россия, F 02M 61/18, F 02M 51/06, F 02M 47/02 // ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».
11. Погуляев Ю.Д., Байтимеров Р.М. Математическая модель процесса впрыска топлива форсункой с двухпозиционным клапаном // Строительные и дорожные машины. — 2012. — № 9. — С. 33–38.
12. Погуляев Ю.Д., Байтимеров Р.М. Топливная система типа Common Rail с гидравлической форсункой и механическим управлением двухпозиционным клапаном // Строительные и дорожные машины. — 2012. — № 12. — С. 16–19.
13. Богачёв С.А., Хрящёв Ю.Е. Электрогидравлическая форсунка с двухпозиционным клапаном // Известия вузов. Машиностроение. — 2002. — № 2–3. — С. 61–75.
14. Подача и распыливание топлива в дизелях // И.В. Астахов, В.И. Трусов, А.С. Хачиян, Л.Н. Голубков. — М., Машиностроение, 1972. — 260 с.