

УДК 621.436.658.589

Ю.Д. Погуляев, Р.М. Байтимеров, В.Н. Наумов, Д.А. Чижов, К.Ю. Машков

**НОВАЯ СИСТЕМА ТОПЛИВОПОДАЧИ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ,  
ПОЗВОЛЯЮЩАЯ УПРАВЛЯТЬ ДАВЛЕНИЯМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ВПРЫСКОВ  
И ВПРЫСКОВ ПОСЛЕ ОСНОВНОГО**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Предложена новая система топливоподачи для дизельного двигателя, позволяющая управлять давлениями предварительных впрысков и впрысков после основного, а также изменять кривую давления основного впрыска.

Данная система представляет из себя 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 актюатор. 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. Расчет проводился для режимов, отличающихся формой основного впрыска: ступенчатый, трапециевидный, треугольный и прямоугольный. 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.

*Ключевые слова:* дизельный двигатель, система впрыска, насос-форсунка, форма основного впрыска, пьезоэлектрический клапан управления давлением.

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 9 порций топлива за один цикл [3]. При этом объемы этих порций могут различаться на два порядка. Так, объем пилотного впрыска может быть  $1 \text{ мм}^3$  и менее, а объем основной порции 100 и более  $\text{мм}^3$  [4].

Объем 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 объемы. 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 поддается.

При относительно малом диаметре отверстий гораздо сложнее реализовать основной впрыск по объему 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 форсунках с одним уровнем отверстий сложно осуществить точное дозирование каждой порции топлива при большой разнице их объемов. 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 проблем. 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. Она может быть реализована без особых технических сложностей и способна разрешить противоречия, упомянутые ранее.

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

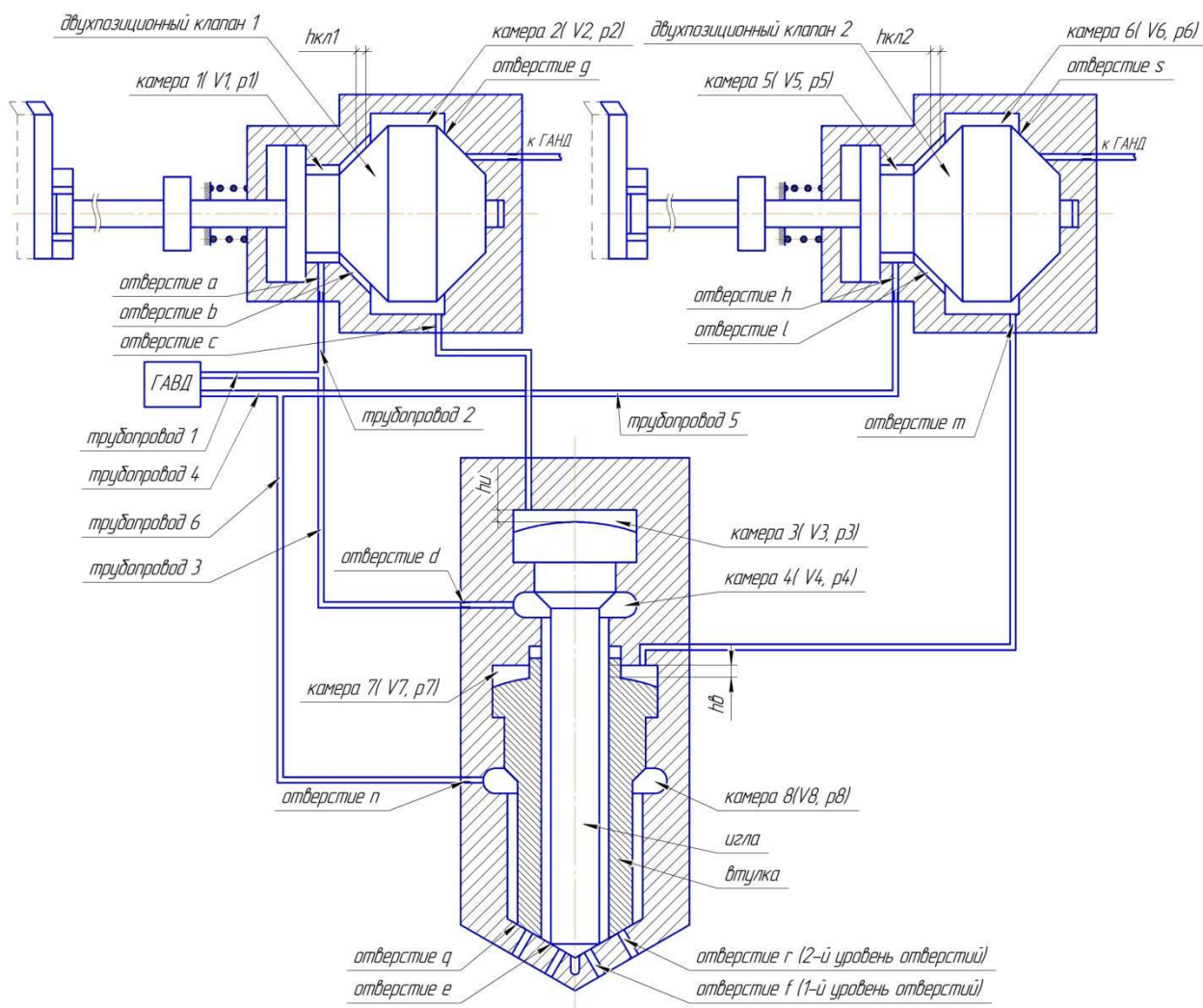


Рис. 1. Расчетная схема форсунки (ГАВД - гидроаккумулятор высокого давления;  $V_i, p_i$  - соответственно объем и давление в  $i$ -й камере;  $h_e, h_a, h_{e1}, h_{e2}$  - максимальные ходы соответственно иглы, втулки, двухпозиционного клапана 1,2 (ДПК1, ДПК2))

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 малого объема топлива.

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

В качестве привода ДПК1 и ДПК2 применяются быстродействующие реверсивные механические привода. Длительность управляющего воздействия для коротких впрысков выбрана как минимально возможная для такого привода при частоте вращения вала управляющего кулачка 1500 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 распыливающие отверстия и на управление для всех трех форсунок.

Получены следующие результаты. Отношение объема основного впрыска к пилотному впрыску для двухуровневой форсунки  $k=49,4$ , и это есть прямое следствие новой конструкции.

Отношение объема основного впрыска к пилотному впрыску для одноуровневой форсунки с  $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$  равно  $k=12,8$ .

Отношение объема основного впрыска к пилотному впрыску для одноуровневой форсунки с  $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$  равно  $k=12$ .

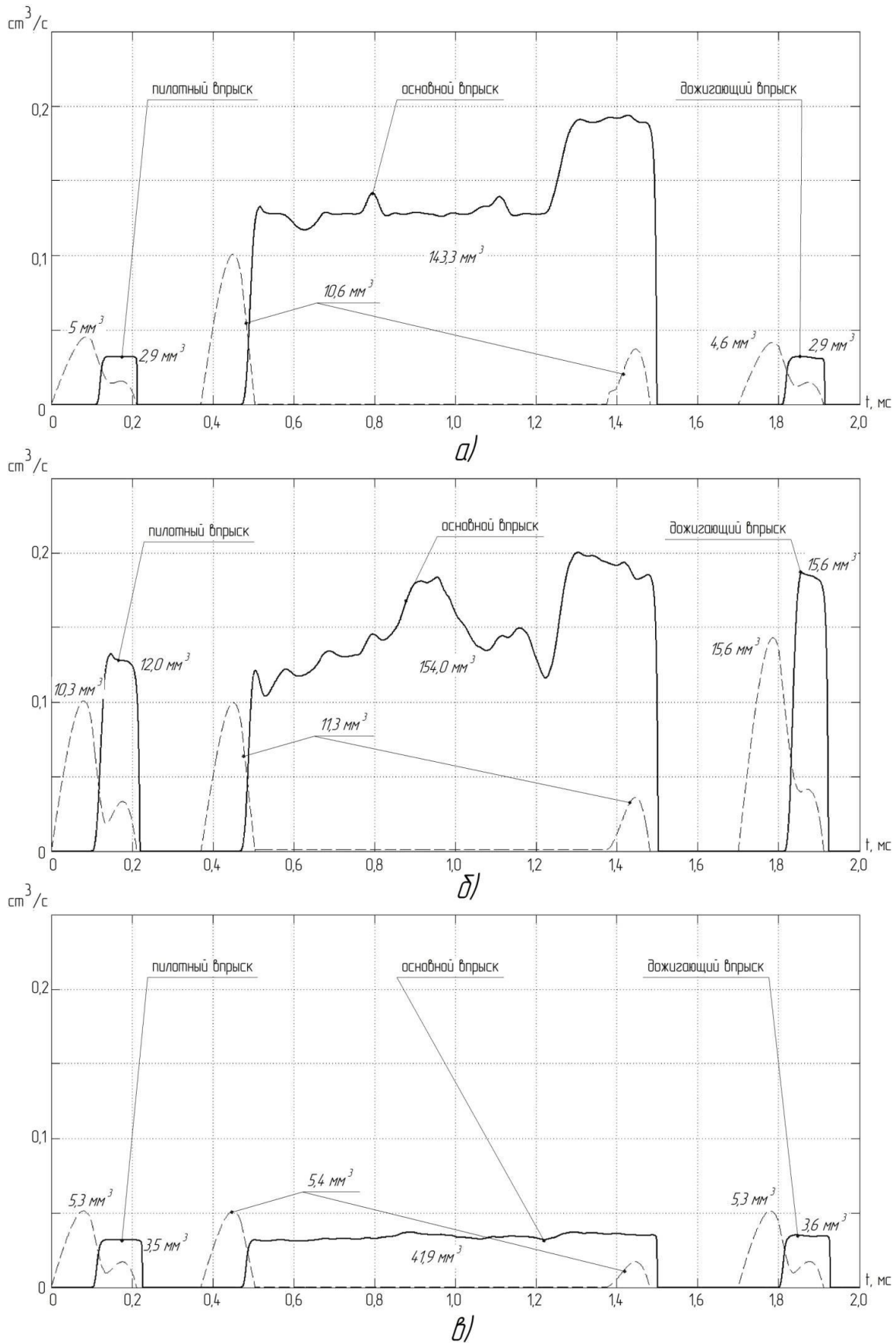
На рис. 2, а видно, что расход топлива на управление для пилотного впрыска составляет  $5 \text{ мм}^3$ , что в два раза меньше расхода топлива на управление для основного впрыска. В то же самое время расход топлива на управление для пилотного впрыска в случае одноуровневых форсунок (рис. 2, б и 2, в) 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 только с помощью одного ДПК, расходы топлива на управление для всех впрысков по объему 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 над одноуровневыми при осуществлении мультивпрыска.

При этом большим недостатком двухуровневой форсунки является значительное ее усложнение по сравнению с одноуровневыми. Становится больше трубопроводов, деталей, форсунка более габаритная и требует двух приводов, по одному на каждый уровень отверстий.



**Рис. 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  $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$

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]:

$$p_u = \frac{(\mu f)_{p1}^2}{(\mu f)_{омс1}^2} (p_4 - P_u) + P_u; \quad p_в = \frac{(\mu f)_{p2}^2}{(\mu f)_{омс2}^2} (p_8 - P_u) + P_u;$$

Здесь  $p_u, p_в$  - давление под конусом соответственно иглы и втулки;  $(\mu f)_{p1}, (\mu f)_{p2}$  - эффективные проходные сечения распылителей соответственно 1-го и 2-го уровней отверстий;  $(\mu f)_{омс1}, (\mu f)_{омс2}$  - эффективные проходные сечения распыливающих отверстий соответственно 1-го и 2-го уровней;  $p_4, p_8$  - давления в 4-й и 8-й камерах (рис. 1);  $P_u$  - давление газа в цилиндре двигателя.

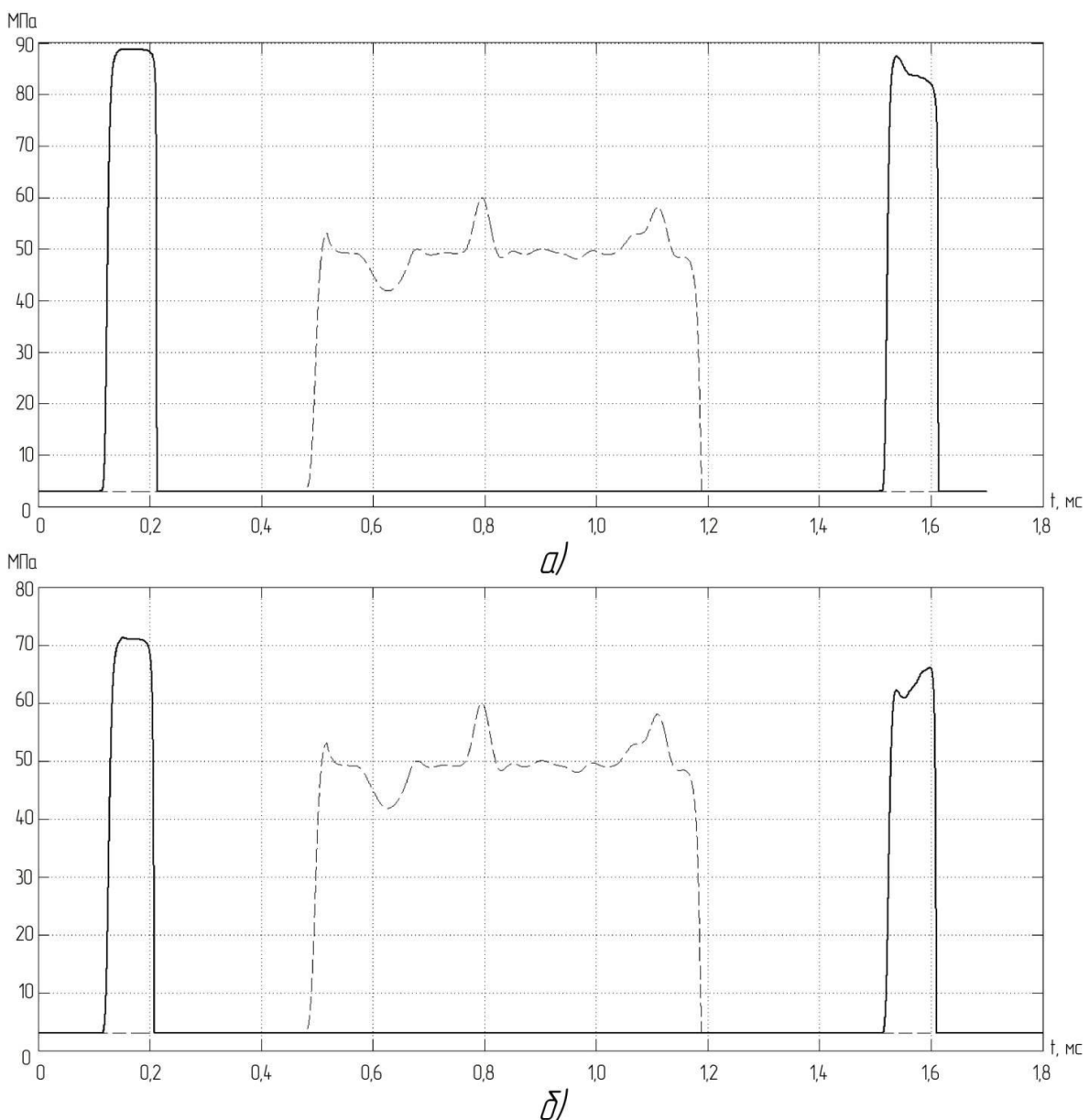


Рис. 3. Диаграммы давлений впрыска для двухуровневой форсунки, первый уровень отверстий (—), второй уровень отверстий (- - -):

а -  $(\mu f)_{омс1} = 0,07 \text{ мм}^2, (\mu f)_{омс2} = 0,38 \text{ мм}^2$ ; б -  $(\mu f)_{омс1} = 0,2 \text{ мм}^2, (\mu f)_{омс2} = 0,38 \text{ мм}^2$

Задача любой ТПС является реализация оптимально цикла топливоподачи. Нужно подобрать такое давления, 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 иглы и втулки, ходы иглы и втулки, чтобы давления впрыска для каждого уровня были оптимальными.

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

Как видно из рис. 3, при  $(\mu f)_{\text{отв}1} = 0,07 \text{ мм}^2$  среднее давление впрыск через первый уровень отверстий около 90 МПа, а при  $(\mu f)_{\text{отв}1} = 0,2 \text{ мм}^2$  уже около 70 МПа. Расчет 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. Проведен расчет мультивпрыска состоящего из пилотного, основного и дожигающего впрыска. 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 счет 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 ДПК1.

### Библиографический список

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. **Врахма, А.** Metodologies 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<sup>®</sup> Light Duty Diesel Common Rail System // Официальный сайт компании Delphi Corporation. URL: <http://www.delphi.com/shared/pdf/ppd/dwtrn/multec-light-duty-diesel-common-rail-system.pdf> (дата обращения: 5.01.2013).
4. **Богачев, С.А.** Разработка топливоподающих систем дизеля нового поколения с целью выполнения перспективных нормативов, ограничивающих токсичность отработавших газов: дисс. ... канд. техни. наук / Богачев С.А. – Ярославль. 2002. – 173 с.
5. **Сергеев, В.М.** Новый способ впрыскивания топлива в форсированных дизелях // Автомобильная промышленность. 1998. №1. С. 33–37.
6. Патент 7404526 США F 02M 61/10. Injection nozzle / Michael P. Cooke; Delphi Technologies, Inc., Troy, MI.
7. Патент 2494294 Канада F 02M 63/04. Fuel injection nozzle / Stephan Haas; MAN B&W Diesel.
8. **Марченко, А.П.** Тенденции развития форсунок аккумуляторных топливных систем типа COMMON RAIL / А.П. Марченко, Д.В. Мешков, И.В. Рыкова // Двигатели внутреннего сгорания. 2005. №1. С. 68–74.

9. Патент 100038054 Германия F 02M 47/06. Cam-controlled injection unit for internal combustion engine/ Ludwig Burger; AVL List GmbH, Graz, AT.
10. Патент 2383772 Россия F 02M 61/18, F 02M 51/06, F 02M 47/02. Способ управления подачей топлива и устройство для его осуществления / Погуляев Ю.Д., Наумов В.Н.; ГОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет".
11. **Погуляев, Ю.Д.** Математическая модель процесса впрыска топлива форсункой с двухпозиционным клапаном / Ю.Д. Погуляев, Р.М. Байтимеров // Строительные и дорожные машины. 2012. №9. С. 33–38.
12. **Погуляев, Ю.Д.** Топливная система типа Common Rail с гидравлической форсункой и механическим управлением двухпозиционным клапаном / Ю.Д. Погуляев, Р.М. Байтимеров // Строительные и дорожные машины. 2012. №12. С. 16–19.
13. **Богачев, С.А.** Электрогидравлическая форсунка с двухпозиционным клапаном / С.А. Богачев, Ю.Е. Хрящев // Известия вузов. Машиностроение. 2002. №2-3. С. 61–75.
14. **Астахов, И.В.** Подача и распыливание топлива в дизелях / И.В. Астахов, В.И. Трусков, А.С. Хачиян, Л.Н. Голубков. – М.: Машиностроение. 1972. – 260 с.

*Дата поступления  
в редакцию 27.05.2014*

**Y.D. Pogulyaev, R.M. Baytimerov, V.N. Naumov, D.A. Chizhov, K.Y. Mashkov**

#### **NEW FUEL DELIVERY SYSTEM FOR DIESEL ENGINE ALLOWING TO CONTROL THE PRE-INJECTION PRESSURES AND INJECTION PRESSURES AFTER THE MAIN**

The new fuel delivery system for diesel engine allowing to control the pre-injection pressures and injection pressures after the main has been proposed. This system also allows to modify the main injection pressure curve. The mathematical model of the fuel injection by the unit injector has been developed. The characteristics of fuel supply for multiphase injection have been calculated based on the mathematical model.

*Key words:* diesel engine, fuel delivery system, unit injector, main injection form, piezoelectric pressure control valve.