УДК 621.436

А.П. Марченко, д-р техн. наук, Д.В. Мешков, асп., И.В. Рыкова, канд. техн. наук.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ФОРСУНОК АККУМУЛЯТОРНЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ТИПА COMMON RAIL

Введение

С момента своего появления в 1997 году аккумуляторные топливные системы постоянно совершенствуются. Причем уровень совершенства всей топливной аппаратуры в большинстве случаев оценивают по техническому уровню применяемых топливных форсунок. К числу постоянно улучшаемых их параметров относятся такие свойства как возможность работы форсунки при повышенных давлениях топлива в аккумуляторе, улучшение быстродействия срабатывания, совершенствование стабильности впрыскивания, снижение энергопотребления. К внедрению подобных мероприятий подталкивают постоянно ужесточающиеся нормы на выброс вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ) дизелей, нормы на уровень внешнего шума, а также конкуренция между производителями, направленная на дальнейшее снижение уровня расхода топлива.

Актуальность проблемы доказывает также то, что ведущие моторостроительные предприятия Украины и России, такие как КП «ХКБД» и ЯМЗ, ведут работы по созданию собственных аккумуляторных топливных систем высокого давления. Момент начала, продолжительность, давление, а в будущем и закон впрыскивания являются теми параметрами, которые позволят перейти на более качественное управление двигателем на участке подвода теплоты. А в сочетании с современными системами наддува перечисленные мероприятия дадут значительный выигрыш экономических показателей на нерасчетных режимах работы дизеля.

Аккумуляторные топливные системы в своем развитии, от момента появления до настоящего времени, прошли несколько этапов. Тенденции развития топливных форсунок:

Фирма Robert Bosch GmbH (Германия). В первых топливных системах фирмы Bosch, выпуск которых был начат в 1997 году, было реализовано давление в 140 МПа [1, 2]. Пришедшие им на смену в 2000 году системы второго поколения способны были развивать давление до 160 МПа и оснащались топливным насосом высокого давления (ТНВД) с электронным регулированием подачи. Также было применено многофазное впрыскивание и улучшенный электромагнитный клапан форсунки. Начало серийного производства третьего поколения системы с быстродействующими пьезоэлектрическими форсунками было начато в мае 2003 года [3]. Данной системой с рабочим давлением 160 МПа были выполнены нормы ЕВРО-4 без применения рециркуляции отработавших газов. Как заявляет производитель, топливная система третьего поколения способна снизить ВВ в ОГ дизеля на 20% при одновременно возросшей мощности на 5%, снижает расход топлива на 3% и ощутимо уменьшает шум на 3 дБ.

Форсунка первого поколения (рис. 1): Торцевой электромагнит 11 с дисковым якорем 10, преодолевая усилие пружины 12, открывает шариковый клапан 8. Давление сверху от мультипликатора 5 падает, и игла 2 открывает проход к сопловым отверстиям. После обесточивания электромагнита и посадки клапана давление справа от мультипликатора восстанавливается через жиклер 7.

К особенностям форсунки можно отнести следующие: пружина 4 иглы для функционирования форсунки необязательна и установлена для превращения заброса газа при отсутствии давления в аккумуляторе. Мультипликатор запирания 5 увеличи-

вает запирающее усилие, действующее на иглу. Такая конструкция позволяет обеспечивать больший диапазон запирающей силы при том же изменении давления. Как показывает расчетный анализ процесса подачи, масса мультипликатора незначительно ухудшает быстродействие системы, хотя он образует с корпусом прецизионную пару и увеличивает габариты. Главное же его значение заключается в том, что увеличение отношения диаметра мультипликатора к диаметру иглы делает процесс более точным, сокращает его продолжительность.

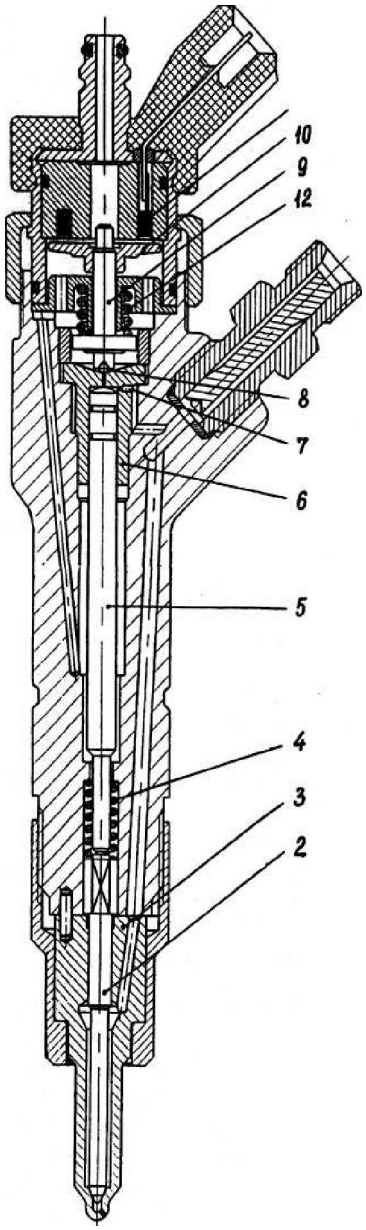

Рис. 1. Электрогидравлическая форсунка Robert Bosch первого поколения

При отношении около 1,0 подача в высокооборотном дизеле нестабильна от цикла к циклу. При отношении менее 1,0 система практически неработоспособна. Для дизеля легкового автомобиля лучшее отношение - 1,25...1,5. Для более тихоходных дизелей можно обойтись и без мультипликатора запирания. В форсунке Bosch ход иглы 0,23±0,03 мм, ход якоря электромагнита 0,050±0,002 мм, минимальный воздушный зазор между якорем и электромагнитом 0,065±0,010 мм. Минимальное количество впрыскиваемого топлива 1,4±0,8 мм^3.

При впрыске мультипликатор своим верхним торцом стремится закрыть осевое отверстие, ведущее к шариковому клапану. Полностью это сделать не удается, т.к. при этом через жиклер восстанавливается высокое давление, и мультипликатор отжимается от отверстия. Однако от процесса установления равновесия мультипликатора имеется реальная польза: ограничивается расход топлива на управление.

Новый вариант форсунки имеет дополнительную пружину снижения смятия седла при ударной посадке капана и для предотвращения повторного открытия капана от волн давления при его посадке. Мультипликатор в нижней части центрируется проставкой. Форсунки устанавливают вертикально и соосно цилиндру и КС. Конструктивно форсунки первого и второго поколения практически идентичны. Отличия между системами в основном состоят в конструктивном исполнении ТНВД [4].

Давление в топливной системе третьего поколения сохранено на уровне 160 МПа [5]. Схема форсунки представлена на рис. 2.

У форсунки, которая получила обозначение CRI3, движение иглы распылителя управляется сервоприводом в клапане впрыскивания. Цикловая подача топлива регулируется длительностью управляющего воздействия на сервопривод. В конструкции можно выделить следующие конструктивные

группы: пьезоактюатор, гидравлическое устройство сопряжения, сервопривод и распылитель. Принцип работы форсунки показан CRI3 на рис. 3.

Рис. 2. Пьезоэлектрическая форсунка Robert Bosch третьего поколения

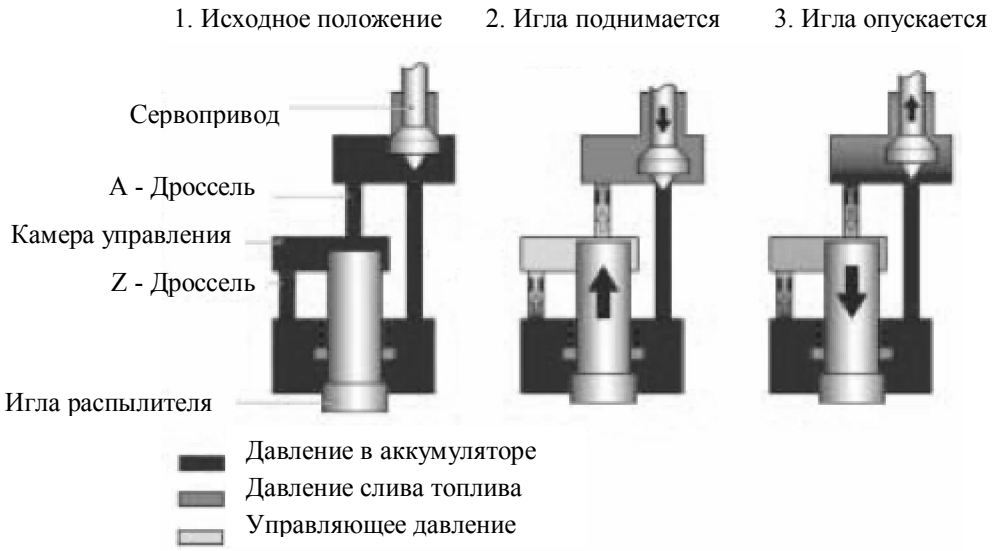

Рис. 3. Принцип работы форсунки CRI3 фирмы Robert Bosch

При отсутствии управляющего воздействия, пьезоактюатор находиться в исходной позиции с закрытым приводом. Это означает, что область высокого давления разобщена с полостью низкого давления. В закрытом положении распылитель находиться благодаря подводимому топливу под высоким давлением.

При подводе к пьезоактюатору напряжения он расширяется, открывает сервопривод, впоследствии чего давление в камере управления снижается, игла

распылителя поднимается и начинается процесс впрыскивания. По окончании впрыскивания сервопривод увеличивает давление в камере управления и распылитель закрывается. Процесс впрыскивания закончен.

Форсунка скомпонована таким образом, что на иглу распылителя не передается механического усилия. Время задерживания срабатывания от начала управляющего воздействия до начала впрыскивания составляет около 150 мс. Максимальная скорость иглы распылителя составляет 1,3 м/с, что практически в два раза выше, чем у всех серийно выпускаемых систем Common Rail.

Фирма Siemens AG (Германия). Топливная система Common Rail фирмы Siemens работает при максимальном давлении топлива в аккумуляторе 150 МПа [6]. В зоне низкой частоты вращения коленчатого вала, до 2500 мин$^{-1}$, система способна производить до пяти раздельных фаз впрыскивания. В зоне средних частот вращения число впрыскиваний сокращается до 2…3. При номинальной частоте вращения производится одно впрыскивание.

Представленная на рис. 4 форсунка отличается исполнительным пьезоприводом гидравлического клапана. Для увеличения хода клапана применен механический рычажный мультипликатор перемещения. В начале своего хода через него передается максимальное усилие, противодействующее высокому давлению, снижения усилия (увеличения перемещения) почти нет: $a/b \approx 1$ (позиция I на рис. 4). В конце хода усилие уменьшается, а ход увеличивается в a/b>1 раз (позиция II на рис. 4). При подаче управляющего импульса на пьезоактюатор он удлиняется на 40 мкм. К особенностям конструкции можно отнести, что в открытом положении пьезоактюатор не расходует электрическую энергию. Минимальное количество впрыскиваемого топлива при максимальном давлении в аккумуляторе составляет 1,5 мм^3. Минимальное время между пилотной и основной порцией впрыскиваемого топлива составляет около 150 мкс.

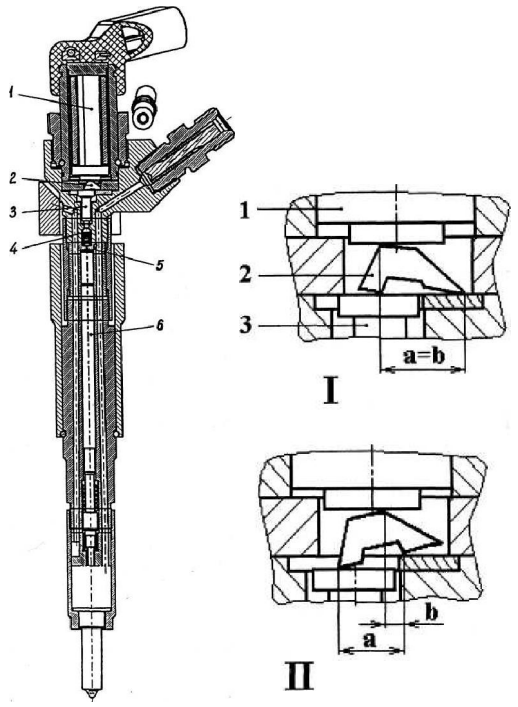

Рис. 4. Пьезоэлектрическая форсунка фирмы Siemens

Фирма L'Orange (Германия). В форсунку Common Rail для дизеля MTU (рис. 5) заложены технические решения, аналогичные форсунке Bosch.

Наряду с электромагнитным приводом 1 пилотного клапана 2 и мультипликатора запирания 5, она содержит еще дополнительный управляющий золотник 3 с промежуточным клапаном 4, уменьшающим расход на управление и увеличивающим быстродействие иглы [1].

Фирма Societe BUDI (Франция). В форсунке (рис. 6) применен гидравлически разгруженный двухзатворный клапан. Электромагнит 1 поднимает якорь 2 с клапаном 4. При этом надыгольная полость 8 разобщается с каналами нагнетания 11 по сечению 6 между клапаном и неподвижной направляющей 5 и сообщается через сечение 7 с каналом слива 3. Тогда игла 10 преодолевает усилие от штанги 9 и начинается впрыск. Форсунка не имеет расхода топлива на

управление, но ее нельзя применить для быстроходного дизеля, должно сопряжение по двум прецизионным поверхностям клапана [1].

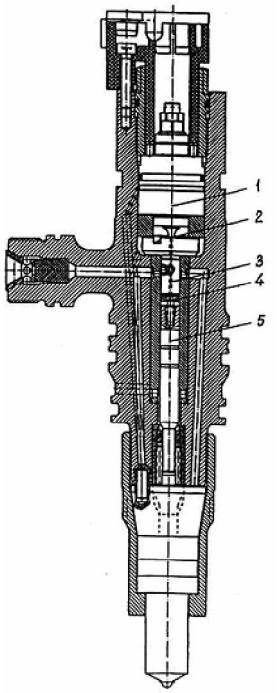

Рис. 5. Форсунка L'Orange

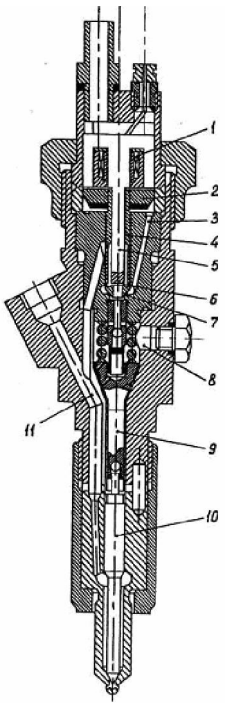

Рис. 6. Форсунка Societe BUDI

Перспективные образцы топливных форсунок системы Common Rail. В Ганноверском университете (Германия) были проведены исследования топливной аппаратуры с пьезофорсунками, в которых осуществлен непосредственный привод к игле форсунки, что позволяет задавать характеристику впрыскивания [4, 7]. Основное преимущества такой топливной системы заключается в свободе выбора необходимой амплитуды и скорости перемещения иглы форсунки. Выбор конструкции основывался на необходимости иметь минимальное количество и массу подвижных частей. В разработанной университетом форсунке пьезопривод воздействует непосредственно на иглу через шток (рис. 7).

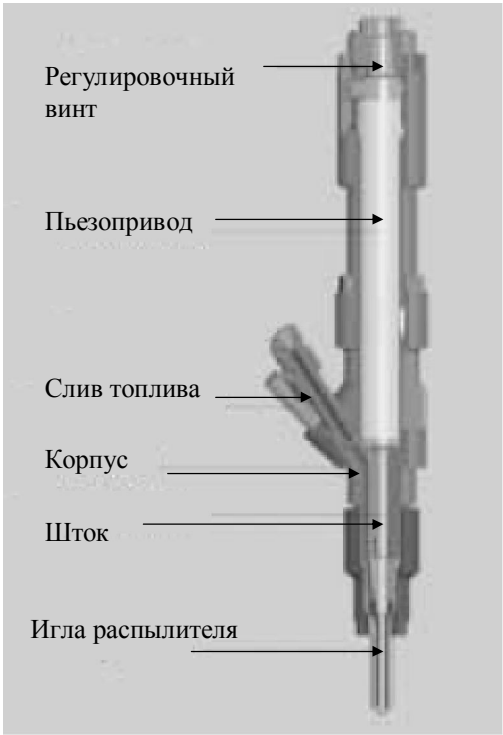

Рис. 7. Пьезоэлектрическая форсунка Ганноверского университета

При разработке пьезоэлектрической форсунки необходимо было принять во внимание то, что на пьезоактюатор через иглу форсунки и шток действует сила давления топлива, поэтому выбор привода проводился исходя из величины максимальной силы,

необходимой для перемещения иглы форсунки и при этом с минимально возможной электрической емкостью пьезоактюатора.

При подаче напряжения к пьезоактюатору он расширяется и, действуя против давления топлива, прижимает иглу форсунки к седлу, тем самым, запирая распыливающие отверстия. При снижении напряжения (разрядке) происходит уменьшение длины пьезоактюатора до величины, соответствующей заданной подаче топлива, игла форсунки за счет давления топлива поднимается и происходит впрыскивание топлива в цилиндр. Скорость запирания и открывания распылителя форсунки непосредственно зависит от времени, за которое пьезоактюатор изменяет свою длину, или от мощности поступившего импульса. От мощности импульса также зависит количество впрыскиваний за единицу времени. При использовании пьезоактюатора с высокой емкостью и при частоте вращения 3500 мин$^{-1}$ возможно осуществление до 10 раздельных фаз впрыскивания. При частоте 5000 мин$^{-1}$ возможно только 6 колебаний.

Кроме того, следует учитывать, что динамические требования к пьезоэлектрической форсунке будут ограничены собственной частотой колебательной системы, состоящей из пьезоактюатора, штока и иглы форсунки. Форсунка оснащена многофункциональным датчиком, фиксирующим движение иглы с температурной компенсацией, а также определяющим силу, возникающую в пьезоактюаторе, и температуру корпуса форсунки. Этот датчик разработан в Ганноверском университете.

Разработанная аппаратура позволяет осуществлять впрыскивание топлива под высоким давлением и в самых минимальных объемах, до одного миллиграмма, а также многократно за один цикл при хорошей воспроизводимости. Исследования топливной системы проводились в университете при давлении в аккумуляторе 150 МПа.

Одним из дальнейших направлений совершенствования являются технология форсунки с регулируемыми распылителями CVN (Coaxial Vario Nozzle) над которой работает в настоящий момент фирма Bosch [10, 11]. Две, расположенные одна в другой иглы, открывают и закрывают свой ряд распыливающих отверстий. Принцип работы показан на рис. 8.

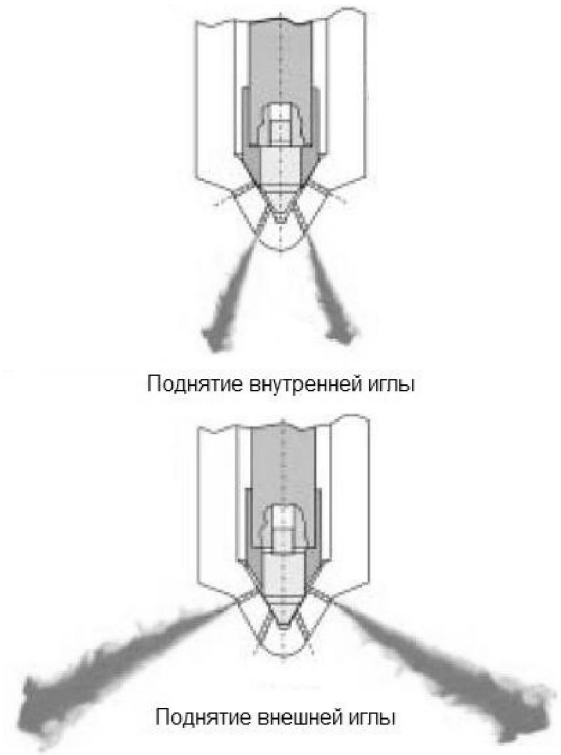

Рис. 8. CVN-распылитель

Каждая игла имеет свой отдельный привод и, варьируя моменты открытия и закрытия игл, последовательность срабатывания и давления впрыскивания, можно добиться положительных результатов в зоне низких частот вращения и малых нагрузок. Вопрос о серийном выпуске пока не стоит, т.к. производитель должен решить ряд технологических проблем.

Еще одной перспективной разработкой является топливная форсунка по технологии HADI (Hydraulically Amplified Diesel Injector) фирмы Bosch [11]. Это так называемые «электрогидравлические насос-форсунки». Форсунки данного типа способны

производить впрыскивание топлива с давлением до 250 МПа. В качестве исполнительного механизма используется электромагнитный клапан нового поколения, благодаря чему двукратное повышение давления топлива происходит непосредственно в корпусе форсунки. Достоинством данной системы является работа при относительно невысоком уровне давления топлива в аккумуляторе, около 135 МПа. Фирма Bosch планирует представить в 2008 году новое поколение топливной системы оснащенной такого типа топливными форсунками.

Выводы:

Проанализировав все вышеизложенное можно выделить несколько направлений совершенствования существующих аккумуляторных систем. Одним из основных направлений является дальнейшее повышение давления впрыскивания (до 220 МПа), что совместно с многофазным впрыскиванием, положительно сказывается на показателях двигателя [8, 9]. Для повышения эффективности системы необходимо применение непосредственного привода иглы распылителя. Здесь наиболее перспективно применение пьезоактюатора, т.к. современные керамики обладают нужными свойствами, имеют невысокую стоимость и низкие затраты электрической энергии на их привод. Одновременно следует учесть, что новое поколение электромагнитных клапанов в состоянии составить конкуренцию пьезоактюатору [11]. Многофазное впрыскивание следует рассматривать как инструмент к поэтапному созданию «гомогенного» дизеля и мероприятие по снижению уровня шума работы. В заключение следует отметить, что возможности внедряемых систем позволяют более качественно перейти на управление процессом сгорания. Новые технологии регулируемых распылителей CVN и HADI открывают новые возможности в управлении рабочим процессом. Также применяемые мероприятия не должны значительно увеличивать стоимость готовой форсунки.

Список литературы:

1. Л.В. Грехов. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением. Учебно-практическое пособие. – М.: Легион-Автодата, 2003.-176 с. 2. Н.А. Иващенко, В.А. Вагнер, Л.В. Грехов Дизельные топливные системы с электронным управлением. Учебно-практическое пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2000. – 111 с. 3. Hummel K., Böcking F., Groß J., Stein J.-O., Dohle U. 3. Generation Pkw-Common-Rail von Bosch mit Piezo-Inline-Injektoren // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2004. – 65. – № 3. – S. 180-189. 4. Новая концепция в двигателестроении – пьезофорсунки. Автостроение за рубежом, 2004. – № 4. – 9 с. 5. Robert Bosch GmbH, Dieselmotor-Management, 3. vollständige überarbeitete und erweiterte Auflage, 2002. – S. 443. 6. Egger K., Warga J., Klügl W. Neues Common-Rail-Einspritzsystem mit Piezo-Aktorik für Pkw-Dieselmotoren // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2002. – 63. – № 9. – S. 696-704. 7. Meyer S., Krause A., Krome D., Merker G.P. Ein flexibles Piezo-Common-Rail-System mit direktgesteuerter Düsennadel // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2002. – 63. – № 2. – S. 86-93. 8. Stegemann J., Meyer S., Rölle T., G.P. Merker Einspritzsystem für eine vollvariable Verlaufsformung // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2004. – 65. – № 2. – S. 114-121. 9. Bauder R., Die Zukunft der Dieselmotoren-Technologie // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 1998. – 59. – № 7/8. – S. 11-18. 10. Статья «Две иглы».; Газета «Авторевю», № 11(313), 2004.-15 с. 11. Bartsch C. Common Rail oder Pumpedüse? Dieseleinspritzung auf neuen Wegen // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2005. – 66. – № 4. – S. 254-258.