

---

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЯ С ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА В ЦИЛИНДР

А.А. Савастенко, М.Е. Степанова

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей

Инженерный факультет

Российский университет дружбы народов

Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093

Работа посвящена исследованию ступенчатого впрыскивания топлива и изучению конструкции двухпружинных форсунок в дизельном двигателе. Известно, что предварительное однократное впрыскивание топлива в дизелях способствует снижению шума, но при этом отмечается увеличение выбросов сажи. В статье рассмотрена конструкция форсунок с двумя иглами, применение которых является обоснованно перспективным и эффективным на дизелях отечественного производства.

**Ключевые слова:** автомобиль, впрыскивание, датчик, дизель, отработавшие газы, топливо, топливopодача, форсунка.

Критериями совершенства топливopодачи являются показатели экономичности, эффективности, шумности работы, динамичности транспортного средства, а также надежности пуска, выбросов токсических компонентов с отработавшими газами и дымности и соблюдение ограничений по давлению в цилиндре, тепловым нагрузкам, температуре газов перед турбиной.

Обобщенно функции топливopодающей аппаратуры (ТПА) изложены в учебнике для вузов [1. С. 456]. Некоторыми особенностями современных систем топливopодачи как с электронным, так и с механическим управлением имеющих достоинства по сравнению с ТПА традиционного типа, являются:

- обеспечение гибкого регулирования цикловой подачи;
- обеспечение минимальной неравномерности подачи по цилиндрам или, напротив, оптимальной неравномерности подачи и угла опережения впрыскивания (УОВ) топлива для каждого цилиндра в соответствии с его особенностями конструкции, изготовления и текущего технического состояния;
- оптимальное регулирование УОВ в соответствии с режимом работы дизеля;
- автоматизация пуска, необходимое обогащение при пуске, выключение подачи на принудительном холостом ходу, регулирование на переходных режимах;
- отключение цилиндров и циклов на холостых ходах и частичных режимах;
- оптимальное регулирование давления и характеристики впрыскивания;
- осуществление двухстадийного или многостадийного впрыскивания, в том числе, с минимальной устойчивой запальной порцией, с регулируемым интервалом между впрысками;
- обеспечение дополнительных впрыскиваний (после основных) для разогрева нейтрализатора DENOX на частичных режимах работы дизелей.

Некоторые из перечисленных требований могут обеспечить двухпружинные форсунки, применяемые в некоторых современных дизелях автотракторного назначения.

Двухпружинные форсунки начали выпускаться фирмой Bosch для автомобильных дизелей как с открытыми, так и с разделенными камерами сгорания (КС) и частотой вращения от 3000 об/мин до 4500 об/мин (БМВ, «Фольксваген», «Мерседес» и др.). Схемы двухпружинных форсунок Bosch для дизелей с неразделенными КС представлены на рис. 1. В дальнейшем к производству форсунок с двухстадийной подачей топлива перешли также японские фирмы Toyota, Isuzu, Nissan и Mitsubishi. Конструктивные схемы этих двухпружинных форсунок несколько отличаются от западно-европейских Bosch.

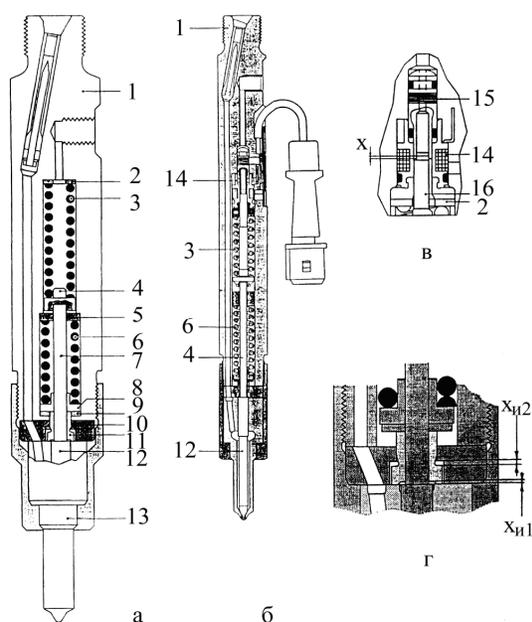


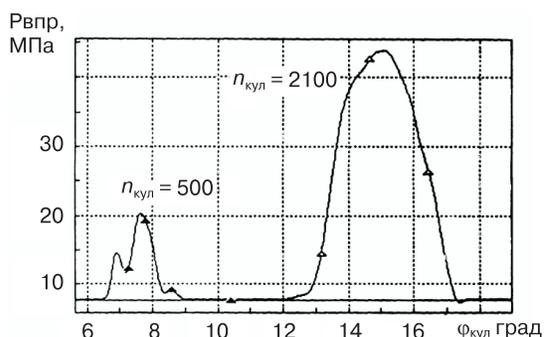
Рис. 1. Двухпружинные форсунки R/Bosch:

- а) 2—4-го цилиндров; б) 1-го цилиндра; в) датчик подъема иглы;
- г) проставка с механизмом последовательного включения пружин

Двухпружинные форсунки (см. рис. 1) призваны обеспечить ступенчатость переднего фронта характеристики впрыскивания за счет более быстрого открытия иглы 12 по первой пружине 3, запирающей ее через тарель 4 и шток 7. При дальнейшем повышении давления игла выбирает зазор между верхним торцом и поднутрением в нижнем торце втулки 11. Тогда через нее и тарель 8 игла сжимает вторую пружину 6. Ход по второй пружине ограничивается упором буртика втулки 11 в проставку 10.

Ход иглы по первой пружине 0,04—0,07 мм, по второй — 0,25—0,28 мм, давление начала впрыскивания по первой — 20—22 МПа, второй — 36—42 МПа. Регулировка затяжки пружин обеспечивается шайбами 2 и 5. Попытки обеспечить ступенчатость характеристики впрыскивания в целях снижения выбросов  $\text{NO}_x$ ,

как показывают результаты расчетов подачи, при упомянутых параметрах форсунки не удаются: ступенчатость исчезает на больших нагрузках и при  $n > 3000$  об/мин (рис. 2). Поэтому такие задачи сейчас не ставят.



**Рис. 2.** Давления впрыскивания при подаче ТНВД VE через двухпружинную форсунку:  
 $g_c = 10$  мг при  $n_{кул} = 500$  и  $2100$  1/мин

Для ТПА с электронным управлением выпускаются двухпружинные форсунки с датчиком 14 подъема иглы (см. рис. 1 б, в). В этом случае удлиненная штанга 4 является подвижным сердечником 16 индукционного датчика. Успокоитель 15 радиальных биений препятствует образованию шумов сигнала. Форсунка остается малогабаритной: диаметр иглы — 4 мм, носика распылителя — 7 мм, накидной гайки — 17 мм, канала в корпусе 1—1,2 мм.

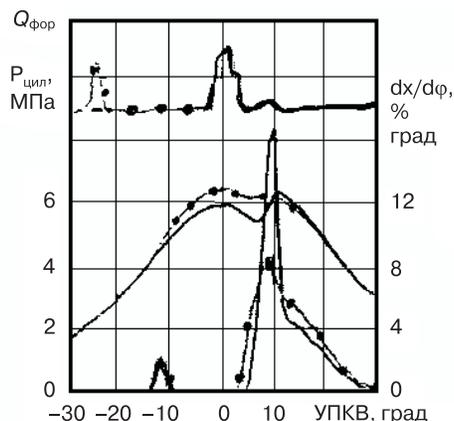
К негативным свойствам двухпружинных форсунок относят потери напора в запорном конусе и усиление зависимости режимов работы дизеля на давление впрыскивания. Сегодня реальным достоинством форсунки является значительное снижение шумности работы дизеля на холостом ходу и малых нагрузках.

Организация двухстадийной и многостадийной подачи является одним из способов формирования заданной характеристики впрыскивания. В современных системах ТПА с электронным управлением используются до 5—7 впрысков за цикл топливоподачи, при этом не возникает проблем с управлением и работой форсунок. Каждый впрыск из множества управляется индивидуально и заканчивается посадкой иглы. Это позволяет сформировать единую универсальную программу управления мини-впрыском, повысить стабильность цикловых подач.

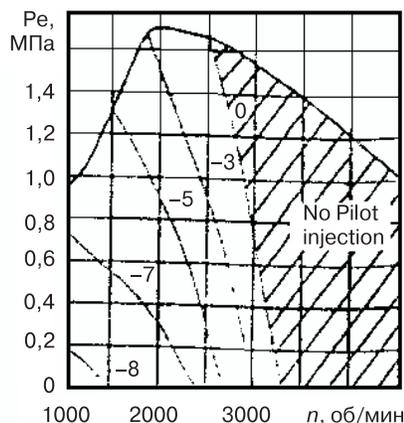
Организация двухстадийного впрыскивания стала легкодоступной для промышленных систем аккумуляторного типа Common Rail (CR).

Подача двух отдельных управляющих импульсов на пьезо- или электромагнитную форсунки позволяет снизить шумность и выбросы оксидов азота  $NO_x$ . Общеизвестно, что сгорание запальной порции топлива увеличивает давление и температуру воздуха в цилиндре, уменьшая задержку воспламенения и жесткость сгорания основной подачи топлива (см. рис. 3, 4).

Этот эффект особенно ощутим на частичных нагрузках и низких частотах вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС), так как тепловое состояние заряда здесь ниже [2]. Это имеет особое значение для двигателей с изношенной цилиндро-поршневой группой.

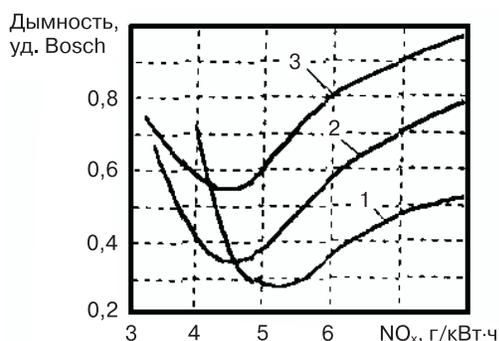


**Рис. 3.** Давление в цилиндре и скорость тепловыделения в дизеле JTD Alfa Romeo 156 при однофазной и двухфазной подаче



**Рис. 4.** Зона рационального использования двухфазной подачи и достигаемое снижение шума (-3— -8 дБ) в дизеле JTD Alfa Romeo 156

Для режимов холостого хода и частичных нагрузок запальная порция топлива должна быть весьма малой, чтобы избежать ухудшения экономичности и увеличения выбросов сажистых частиц (рис. 5) [2].

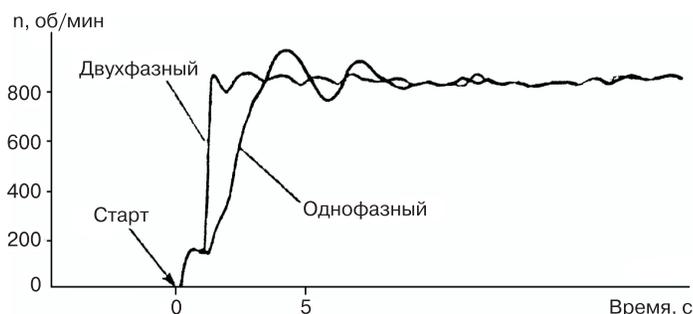


**Рис. 5.** Дымность отработавших газов дизеля с  $N_e^{цил} = 30\text{—}50$  кВт,  $n = 2000$  1/мин,  $P_{акк} = 80$  МПа:  
1) однофазный впрыск; 2) двухфазный впрыск, продолжительность запального впрыска 1,8 град УПКВ; 3) то же с продолжительностью 2,8 град.

Двухстадийный впрыск улучшает протекание рабочих процессов на режимах холодного пуска, на холостом ходу; сокращается выброс углеводородов как на установившихся, так и на переходных режимах работы (рис. 6) [2. С. 176].

Системы впрыскивания дизельного топлива с электронным управлением приобретает наибольшую популярность в настоящее время. Они устанавливаются как на легковой, так и на грузовой автомобильный транспорт, эксплуатирующийся в условиях мегаполиса, и отвечают требованиям Евро 3 — Евро 5.

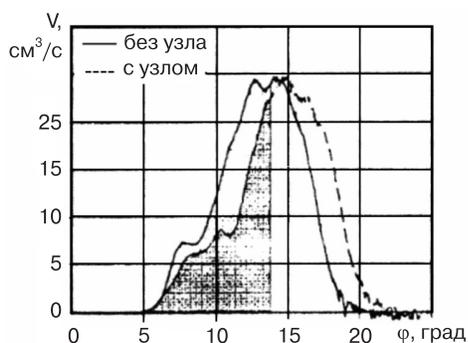
Для автомобильного транспорта и тракторных дизелей, находящихся в эксплуатации в труднодоступных по обеспечению качественным горючим районах, эти системы не подходят. Они очень требовательны к степени очистки дизельного топлива и качеству моторных масел.



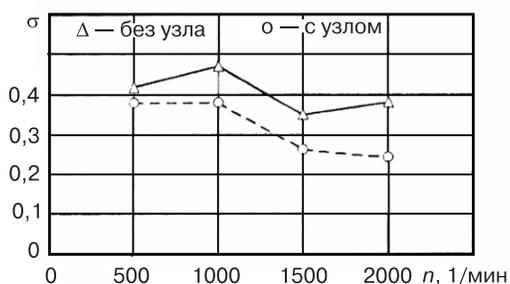
**Рис. 6.** Время запуска дизеля JTD при температуре воздуха  $-15^{\circ}\text{C}$  при различных законах впрыска топлива

Альтернативой аккумуляторным системам CR с электронным управлением здесь могут послужить некоторые типы традиционных механических систем ТПА с двухстадийным процессом подачи топлива. В частности, фирма «Nippon Denso» устанавливает на топливный насос высокого давления (ТНВД) типа VE специальное устройство, обеспечивающее создание предварительной дозы топлива, подаваемой в цилиндр. Описание данной системы подробно описано в работе [3]. Исследование процессов в топливной аппаратуре проводилось на безмоторном топливном стенде КИ-15711 в лаборатории кафедры теплотехники и тепловых двигателей РУДН. Испытания носили сравнительный характер. Исследовался ТНВД распределительного типа VE 4/10 F 2100 RND 498 с узлом предварительного впрыскивания и без него. Форсунка оснащалась датчиком скорости подъема иглы распылителя. Расход топлива через форсунку измерили объемным способом с помощью мерных мензурок с делением  $1\text{ мм}^3$ , установленных на стенде. В качестве датчиков давления использовался пьезодатчик Т-6000. Пьезодатчик давления работал в комплекте с измерительно-вычислительным комплексом ИВК «ДВС». В качестве контролирующей аппаратуры использовался светолучевой осциллограф, с помощью которого визуально наблюдались давления у штуцера форсунки и скорости иглы.

Результаты эксперимента на измерительно-вычислительное устройство выводились в виде массивов данных и сохранялись в ПЭВМ. При обработке массива скорости иглы распылителя определялось перемещение иглы путем интегрирования по углу поворота вала насоса (рис. 7, 8).



**Рис. 7.** Законы подачи топлива без узла и с узлом предварительной подачи топлива



**Рис. 8.** Динамичность процесса топливоподачи с узлом подачи предварительной дозы и без него

В результате экспериментов с углом предварительного впрыскивания снижается динамика процесса топливоподачи вначале впрыскивания; с увеличением частоты вращения динамичность впрыскивания снижается более интенсивно.

Проведенные исследования показывают целесообразность применения устройств для подачи предварительных доз топлива в системах с ТНВД распределительного типа.

Японская фирма Zexel, производящая топливную аппаратуру по лицензии фирмы Bosch, выпускает кулачковую шайбу с двойным выпуклым профилем для ТНВД типа VE. Двойной профиль позволяет организовать двухстадийный впрыск для обычных, однопружинных форсунок. Фирма гарантирует бесшумную работу дизеля на режимах холостого хода и частичных нагрузках, а также более устойчивую работу дизеля 4M40T (Mitsubishi Pajero) на холостом ходу.

Данные устройства не изменяют в целом конструкцию ТНВД существующих дизелей, но требуют больших технологических затрат на выполнение профильных элементов.

С этой точки зрения, наиболее выгодным является применение двухпружинных форсунок для организации двухстадийной подачи топлива в цилиндр дизеля. Данные форсунки можно перерегулировать на любые давления как по первому впрыскиванию предварительной дозы топлива, так и по второму — основному — впрыскиванию. В этом состоит универсальность применяемых форсунок для различных дизелей. Примером служат форсунки автомобиля Toyota Land Cruiser с дизелем 1HD-FT и 1HD-FTE.

Таким образом, проведенные исследования ступенчатого впрыскивания топлива и существующих конструкций двухпружинных форсунок автомобильных дизелей говорят об эффективности данных систем в эксплуатации и перспективах применения их на дизелях отечественного производства.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ефимов С.И., Иващенко Н.А., Ивина В.И.* и др. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей». 3-е изд. перераб. и доп. / Под общ. ред. А.С. Орлина. — М.: Машиностроение, 1985.
- [2] *Грехов Л.В.* Топливная аппаратура с электронным управлением дизелей и двигателей с непосредственным впрыском бензина: Учебно-практическое пособие. — М.: Легион-Автодата, 2001.
- [3] *Савастенко А.А., Кузяков В.В., Девянин С.Н.* Исследования ступенчатой подачи топлива ТНВД фирмы «Nippon Denso» // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2003. — № 1. — С. 74—78.

## **OPERATION FEATURES OF TWO-STAGE INJECTION PROCES IN DIESEL FUEL SYSTEM**

**A.A. Savastenko, M.E. Stepanova**

Department of heating engineers and heat engines  
Faculty of Engineering  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Podolskoe shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093*

This work is dedicated to phase fuel injection research and double-spring injectors of diesel engines design analysis. It is known that preliminary fuel injection in diesel engines leads to noise reduction but at the same time soot emission increase noted. Article contains design analysis of injectors with two needles, application of which is perspective and effective in domestic diesel engines.

**Key words:** car, injection, sensor, diesel, exhaust gases, fuel, fuel supply, injector.