

УДК 662.758.3:629.063.6

Половинка Э.М., Карпилов Ю.А.
ОНМА

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ СОВРЕМЕННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Современные требования в отношении влияния двигателей внутреннего сгорания на экологию окружающей среды заставляют конструкторов и исследователей искать методы уменьшения количества выбросов вредных веществ в атмосферу.

Основными токсичными веществами, выбрасываемыми современными дизелями являются твердые частицы (сажа, оксиды серы SO_2 , тяжелые углеводороды), оксиды азота (NO_x), монооксид углерода (CO), углеводороды (CH), оксиды серы. В настоящее время нормируются выбросы частиц, NO_x , CO , CH , а также дымность отработанных газов.

Максимально допустимые выбросы NO_x для судовых дизелей внутреннего сгорания, согласно Marpol Annex VI, приведены на диаграмме (рис. 1). [1].

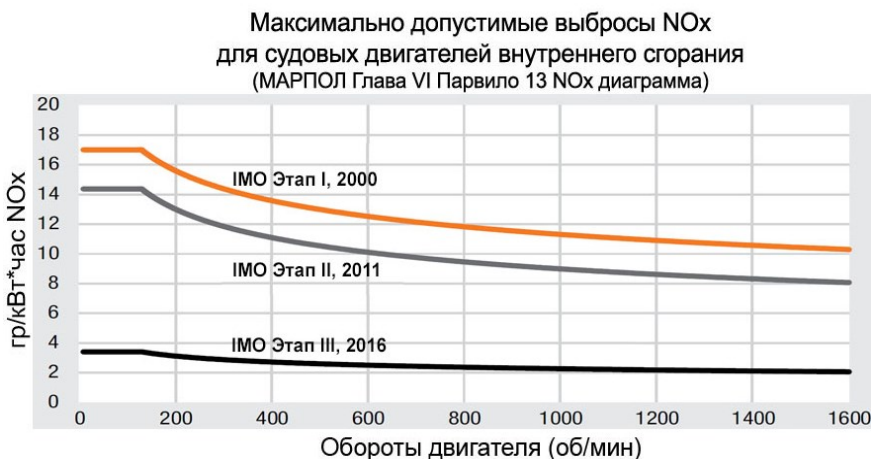


Рис. 1. Максимально допустимые выбросы NO_x для судовых дизелей

Наиболее перспективным способом уменьшения вредных выбросов двигателями внутреннего сгорания являются разработки в области совершенствования топливоподающей аппаратуры, в частности

использования аккумуляторных системы топливоподачи, форсунок с электронным/электрогидравлическим управлением и т.д. (рис.2) [2]



Рис. 2. Ключевые факторы разработок топливных систем дизелей

Самыми популярными топливными системами на данный момент являются аккумуляторные, которые начали выпускаться с 1997 года и получили название «COMMON RAIL». Эти системы имеют целый ряд преимуществ по сравнению с обычными топливными системами (систем непосредственного действия):

- широкая область применения (автотракторные, тепловозные и судовые дизели цилиндровой мощностью);
- применение топливного насоса высокого давления со сниженной нагруженностью привода и меньшей виброактивностью;
- независимо друг от друга оптимальная величина цикловой подачи и давление впрыскивания топлива должны определяться для всех эксплуатационных условий работы двигателя;
- переменный угол опережения впрыскивания;
- возможность формирования процесса двухфазного и многофазного впрыскивания.

Создание давления и непосредственный процесс впрыскивания в аккумуляторной топливной системе CR полностью разделены. Высокое давление в топливной системе создается независимо от частоты вращения коленчатого вала двигателя и количества впрыскиваемого топлива. Топливо, готовое для впрыскивания, находится под

высоким давлением в аккумуляторе. Количество впрыскиваемого топлива определяется заданием поста управления двигателя, а угол опережения и давление впрыскивания определяются электронным блоком управления на основе программируемых матриц характеристик, хранящихся в памяти микропроцессора. Электронный блок управления выдает управляющий пусковой сигнал на соответствующие электромагнитные клапаны, в результате чего осуществляется впрыскивание форсункой в каждый цилиндр. [4]

Компания Bosch, выпустившая систему "Common Rail Diesel Injection", добилась колоссального прорыва в области топливopодaющей аппаратуры. Уменьшился расход топлива на 15%, реже стал требоваться ремонт, а так же на 40% увеличилась мощность двигателя, что дало возможность увеличить динамические и мощностные характеристики двигателей, не изменяя при этом их размеров. Эти системы могут обеспечить различные характеристики впрыскивания топлива. В частности реализуется двухфазная характеристика: подача запального и основного топлива. Из-за этого в камере сгорания давление поднимается плавно, а поэтому двигатель работает плавно и намного тише. Данная система обладает рядом положительных характеристик, таких как малый расход топлива; повышена мощность двигателя; понижена токсичность выхлопных газов; понижено образование сажи при работе двигателя; очень низкий уровень шума в двигателе. [10]

Компания Wärtsilä уже много лет ведет разработки в области Common Rail систем, применяя их на судах различного типа. Их исследования показали, что использование системы CR и деталей топливной аппаратуры из современных материалов позволяет увеличить срок службы топливной аппаратуры. Так использование плунжера с напылением из нитрида кремния с посадочным местом из карбида вольфрама в CR системе на практике показывает жизнеспособность в 30 000 часов. [6] Но, самыми главными достижениями систем CR, с учетом сегодняшних экологических рамок, являются уменьшение дымности двигателей и выбросов NO_x . [7]

Компания MAN B&W так же активно занимается разработками в области систем Common Rail и имеет очень впечатляющие результаты в вопросах экологии (рис.3а и рис.3б). [8]

Выбросы сажи

FSN

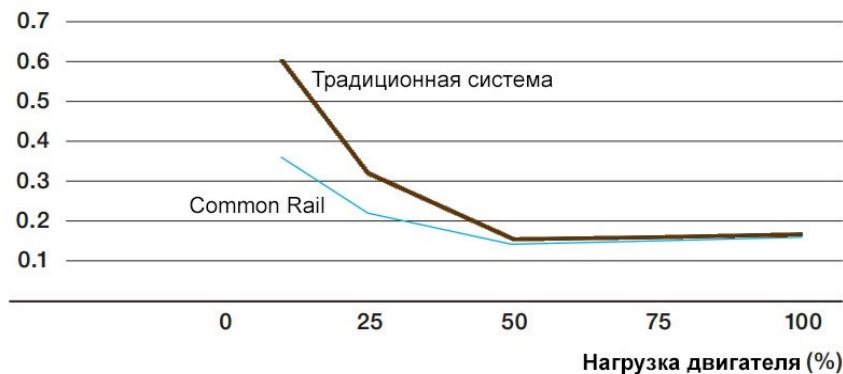


Рис.3а. Сравнение выбросов сажи CR и традиционных двигателей MAN B&W

NO_x

%

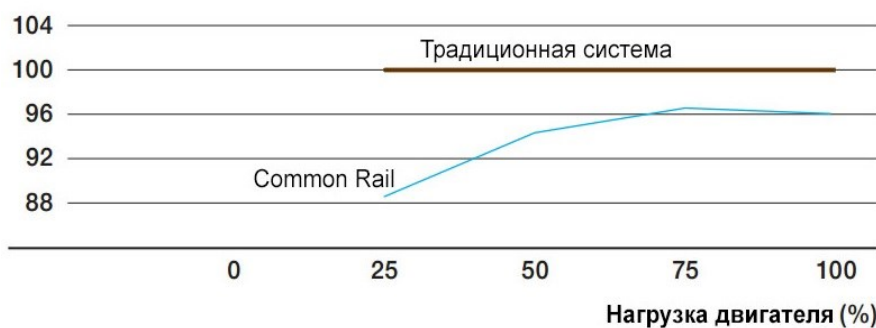


Рис.3б. Сравнение выбросов NO_x CR и традиционных двигателей MAN B&W

Электронные системы управления подачей топлива позволяют обеспечивать гибкое регулирование угла опережения впрыскивания и характеристики впрыскивания. Электронное управление имеет целый ряд преимуществ перед механическим, из которых стоит отметить гибкое регулирование цикловой подачи, минимальную неравномерность подачи по цилиндрам, регулирования оптимального ре-

жима углов опережения впрыскивания, моментальная диагностика системы и выбор режима работы двигателя в соответствии с его состоянием в данный момент времени и т.д.

Так же в современном дизелестроении для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу стали использовать насос-форсунки, которые имеют двухступенчатый электроуправляемый дозирующий клапан. Насос-форсунки позволяют увеличить давление впрыскивания топлива до 2000 кг/см^2 , и, благодаря своим функциям, снизить нагрузку на линии высокого давления. Такие форсунки относительно компактны, более стабильный гидравлический привод, вследствие снижения объема высокого давления выросла эффективность гидравлики. [4]

На рисунке 4 представлена насос-форсунка фирмы «BOSCH» третьего поколения и мгновенные характеристики ее работы. Изучив кривые давления на распылителе, ход иглы распылителя и интенсивность впрыскивания можно говорить о достаточной стабильности работы такого механизма и рациональности применения этих форсунок в дизелестроении. [5]

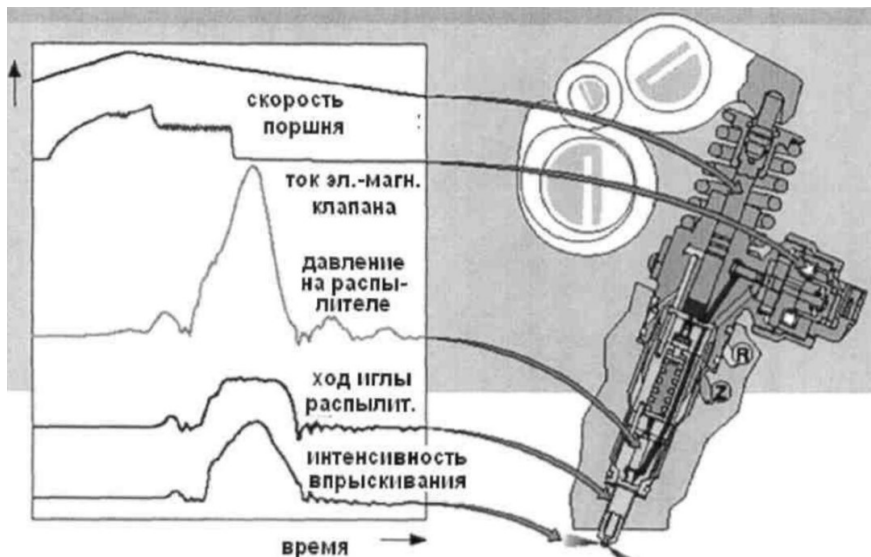


Рис. 4. Насос-форсунка фирмы «BOSCH» и мгновенные характеристики ее работы

Так же одним из направлений развития топливной аппаратуры стало применение форсунок с мультипликатором давления, которые позволяют осуществлять предварительное впрыскивание топлива на более низком давлении, а так же подвпрыск на высоком давлении для снижения количества образывающейся сажи. Эта система называется APCRS и была разработанная фирмой «BOSCH». В APCRS реализована возможность питания форсунки, как от аккумулятора, минуя мультипликатор давления, так и от мультипликатора с повышенным давлением относительно аккумулятора. То есть такая система дает более широкие возможности по управлению впрыскиванием топлива и позволяет достичь лучших динамических характеристик двигателя. [4] Так же на данный момент активной разработкой электрогидравлических форсунок с мультипликатором занимаются Д.Г. Шеметов, О.В. Дробышев и М.Э. Брякотин. [3].

Ими рассмотрено формирование ступенчатой характеристики впрыскивания топлива электрогидравлической форсункой с мультипликатором давления, схема которой представлена на рисунке 5. Особенностью их исследования является использование двухходовой иглы распылителя управляемой гидравликой. Управление данной форсункой осуществляется электронным блоком управления, который подаёт управляющие сигналы на электромагнит форсунки и регулятор давления насоса высокого давления. В форсунке используется жиклер, функцией которого является задержка периода срабатывания клапана гидроуправления, а шариковый клапан используется для максимально быстрого наращивания давления над клапаном гидроуправления, минуя при этом ограничитель расхода (жиклер).

Ступенчатое впрыскивание топлива позволяет снизить скорость нарастания давления в фазе горения и максимальное давление цикла, в результате чего уменьшается шум сгорания, что наиболее явно заметно при малой частоте вращения и нагрузке. Осуществляется он в две фазы. Первая фаза – игла доходит до упора (поршня мультипликатора запираания иглы 3) на высоту 0.03мм на 0.5мс, в это время происходит нарастание давление в мультипликаторе и непрерывное впрыскивание (линия 1 на рисунке 7), а когда высокое давление достигнет кармана распылителя, наступает вторая фаза, открывающее усилие иглы возрастает и, преодолевая силу поршня гидрозапора, игла открывается на полный ход, равный 0.3 мм на 0.7 мс (линия 2 на рисунке 7).

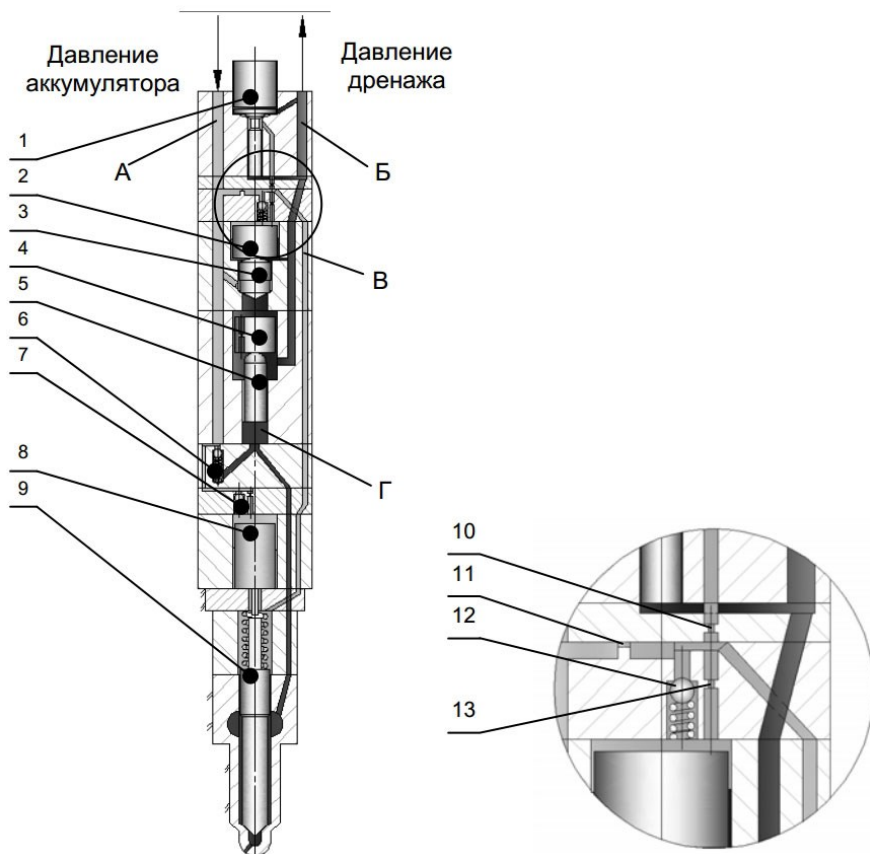


Рис. 5. Схема электрогидравлической форсунки с мультипликатором давления: 1 – электромагнитный клапан; 2 – мультипликатор заперия клапана гидроуправления; 3 – клапан гидроуправления; 4 – поршень мультипликатора; 5 – плунжер мультипликатора; 6 – шариковый клапан мультипликатора; 7 – шариковый клапан мультипликатора гидрозаперия иглы; 8 – поршень мультипликатора гидрозаперия иглы; 9 – игла распылителя; 10 – дренажный жиклёр полости управления; 11 – наполнительный жиклёр полости управления; 12 – шариковый клапан клапана гидроуправления; 13 – жиклёр клапана гидроуправления

В целом графики выглядят вполне стабильными, что позволяет надеяться на получение приемлемых результатов при их работе в условиях эксплуатации. Но, как сообщает автор, на данный момент эта система еще проходит тестирование и доработки.

Кратковременно полное или частичное открытие электромагнитного клапана позволяет организовать предвпрыск. Уровень понижения давления в полости управления достаточен для того, чтобы игла дошла до первого упора, но для открытия клапана гидроуправления – он недостаточен. При этом мультипликатор давления не работает. Варьируя интервалом между предвпрыском и основным впрыскиванием можно добиться «включаемости» и «выключаемости» ступенчатости у основной дозы впрыскиваемого топлива. Этот эффект достигается за счёт колебательных процессов происходящих в электрогидравлической форсунке. Конечно это не показатель стабильной работы, потому что процесс перехода от «ступенчатой» к «не ступенчатой» характеристики впрыскивания будет сопровождаться разной цикловой подачей топлива.

Подобный механизм вызывает сомнение в долговечности работы отдельных деталей форсунки, можно согласиться с авторами исследования в том, что представленная форсунка требует более тщательного изучения и математического анализа. [3]

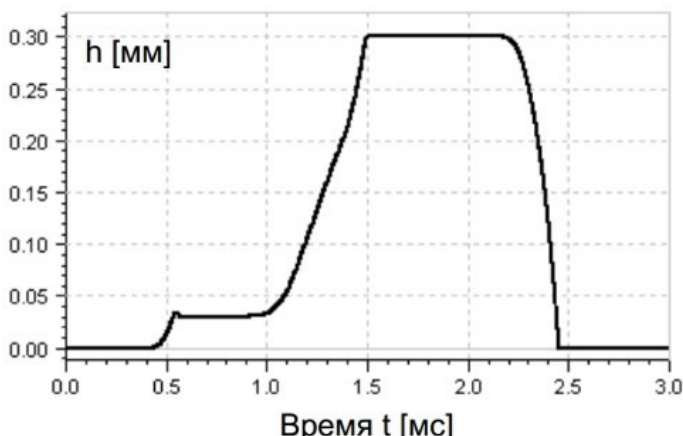


Рис.6. Перемещение иглы распылителя

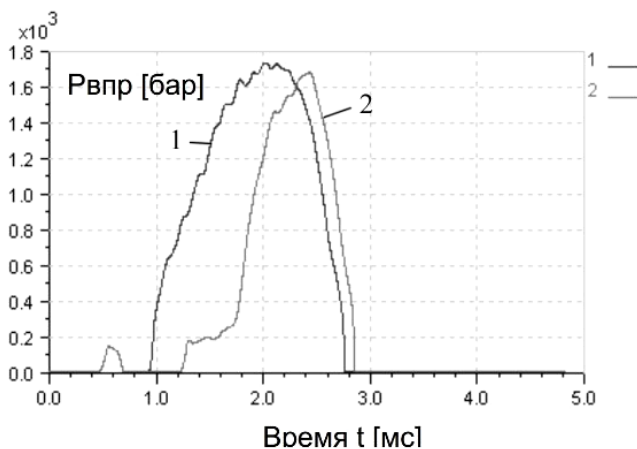


Рис.7. Давления впрыскивания ЭГФ

Компания MAN B&W ведет разработки, в том числе и в направлении контроля режимов работы двигателей. Так, на рисунке 8 приведен пример изменения режима работы двигателя с экономичного режима работы на режим сниженного выброса NO_x . Как мы видим, в режиме экономичного хода, подача топлива осуществляется в одно впрыскивание на протяжении 15 градусов оборота коленчатого вала, при этом максимальное давление сгорания достигается 155 кг/см^2 на 195ом градусе поворота коленчатого вала, а момент начала видимого сгорания топлива начинается на 182ом градусе поворота коленчатого вала и происходит при давлении 120 кг/см^2 . Выбросы NO_x при работе двигателя в этом режиме колеблются в пределах 1150-1180ppm. Изменение режима работы двигателя на режим сниженного выброса NO_x происходит в течение 15 секунд и уровень выбросов NO_x падает до 480ppm. При этом двигатель начинает работать более плавно, максимальное давление сгорания снижается до 122 кг/см^2 и достигается на 122ом градусе поворота коленчатого вала, а момент начала видимого сгорания топлива приходится на 176ом градус поворота коленчатого вала при давлении в 117 кг/см^2 . Подача топлива в таком режиме происходит с предвпрыском, максимальное давление топлива приходится 181ый градус поворота коленчатого вала и составляет 470 кг/см^2 , а максимальное давление основного впрыскивания приходится на 197ой градус поворота коленчатого вала и составляет 750 кг/см^2 . [11]

Так же из общих элементов топливной системы ведутся разработки более скоростных электромагнитных клапанов для снижения нежелательных эффектов в начале и конце подачи топлива и увеличения числа настроечных функций форсунки. Принцип действия пьезопривода основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте. Этот эффект заключается в изменении размеров пьезоэлемента при приложении к нему напряжения. Приращение длины пьезоэлемента прямо пропорционально прилагаемому напряжению. Таким образом, можно управлять приращением длины пьезоэлемента, изменяя напряжение на его обкладках. [9]

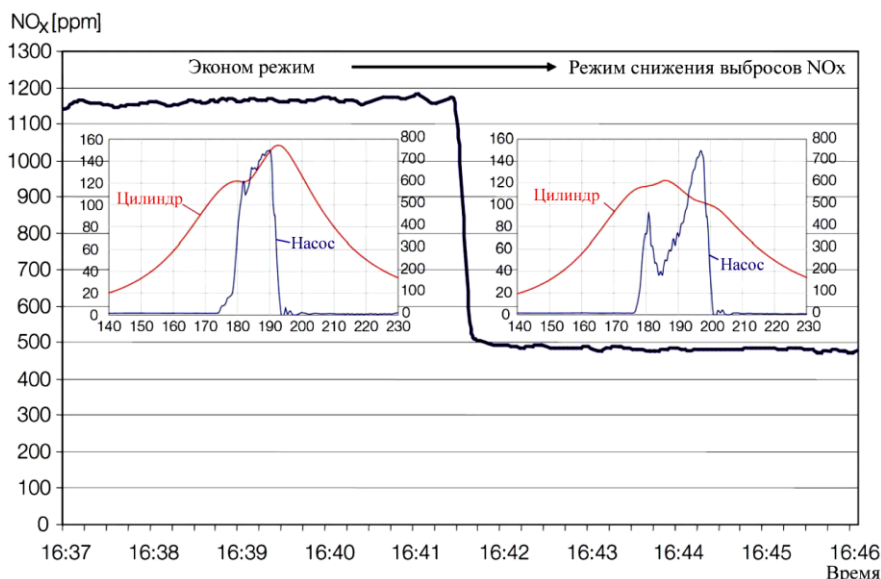


Рис.8. Сравнение режимов работы двигателя

Первоочередной причиной необходимости развития топливной аппаратуры является уменьшение выбросов вредных веществ в атмосферу, а так же уменьшение расхода топлива и увеличение срока службы отдельных элементов дизелей. Основные направления развития топливной аппаратуры – это развитие систем «COMMON RAIL» и систем с мультипликаторами давления, насос-форсунок, а так же отдельных компонентов этих систем, таких как электромагнитные клапана, разработка и усовершенствование программного обеспечения для управления системами топливоподачи и т.д.

Наиболее же эффективным является комплексное использование систем «COMMON RAIL» и форсунок с мультипликаторами давления, так как такая система позволяет более гибко регулировать характеристики впрыскивания при различных режимах работы двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MARPOL 73/78 Annex VI Marine Diesel Engine Requirements // <http://www.epa.gov/oms/regs/nonroad/marine/ci/f99038.pdf>
2. Future and Potential of Diesel Injection Systems // <http://ingenieria.udea.edu.co/investigacion/grupogas/docs/Maquinas.pdf>
3. Шеметов Д.Г., Дробышев О.В., Брякотин М.Э. Фомирование ступенчатой характеристики впрыска топлива электрогидравлической форсункой с мультипликатором давления. // <http://elibrary.ru/elibrary/2007/04/pdf/104%20shemetov.pdf>
4. Диссертация «Компоненты перспективных топливных систем аккумуляторного типа с электронным управлением для транспортных дизелей» Фонов В. В. – Москва – 2004.
5. Актуальные вопросы создания топливоподающих систем транспортных дизелей // Презентация фирмы Robert Bosch GmbH: Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 30-летию ЯЗДА. - Ярославль, 2002.
6. «Experience and development of world's first Common-Rail Injection System for Heavy-Fuel operated Medium-Speed Diesel Engines» Robert Ollus, Wärtsilä Finland Oy, Finland
7. «Benefits by Common Rail injection» Wärtsilä // <http://www.pomorci.com/Edukacija/1-20/Benefits%20by%20Common%20Rail.pdf>
8. "Common Rail. Design and maturity" MAN B&W // http://www.mandieselturbo.com/files/news/files_of_15326/TP_CommonRail_DRUCKDATEN.pdf
9. «Насос-форсунка с пьезоэлектрическим клапаном» Volkswagen AG // http://www.autodela.ru/assets/files/books/VW/352_Siemens_VDO_Automotive.pdf

10. «Common Rail Diesel Injection»

11. // [http://diesel-ural.ru/index.php/article/archive/63/
MAN «Fuel Injection System»](http://diesel-ural.ru/index.php/article/archive/63/MAN_Fuel_Injection_System) 2009 /11 /26