

19. Bezyukov, Oleg. "Kriterij dlja ocenki nauchno-tehnicheskogo urovnja sudovyh dizelej." *Tr. mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminara "Issledovanie, projektirovanie i jekspluatsija sudovyh DVS"*. SPb.: Park-Com, 2006: 16–19.

20. Maksimets, A. V. Izmerenie rashoda topliva sudovymi dizeljami ultrazvukovym metodom v usloviyah jekspluatsii: abstract of PhD diss. (Tech.). SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2004.

21. Orlov, A. E. Metodika opredelenija rashoda topliva i jeffektivnoj moshhnosti sudovogo DVS v usloviyah jekspluatsii: abstract of PhD diss. (Tech.). SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Афанасьева Ольга Владимировна —
кандидат технических наук, доцент.
Национальный минерально-сырьевой
университет «Горный»
OVAf@rambler.ru
Денисова Анастасия Александровна — соискатель.
Научный руководитель:
Безюков Олег Константинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
an-denisova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru
Afanasyeva Olga Vladimirovna —
PhD, associate professor.
National Mineral Resources University
(Mining University)
OVAf@rambler.ru
Denisova Anastasiya Aleksandrovna — applicant.
Supervisor:
Bezyukov Oleg Konstantinovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
an-denisova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.

УДК 621.431.074

**Г. Е. Живлюк,
А. П. Петров**

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ COMMON RAIL

Современный поршневого двигателя внутреннего сгорания невозможно представить без систем подачи топлива с электронным управлением, изменения фаз газораспределения, наддува и т. д. Таким образом, под программное управление электроникой переданы важнейшие процессы, протекающие в ДВС на всех эксплуатационных режимах.

Настоящая статья сосредоточена на рассмотрении направлений создания и развития аккумуляторных систем топливоподачи высокого давления. Показано, что необходимый уровень давления и требуемые характеристики впрыска могут быть обеспечены современными системами с электронным управлением типа Common Rail. Внедрение подобных систем как одного из способов улучшения топливной экономичности и повышения экологической безопасности судовых дизельных установок вызвано жизненной необходимостью. Показаны достижения в части разработки и организации процесса топливоподачи высокого давления применительно к двигателям различной мощности судового и наземного назначения, выбора соответствующих материалов для агрегатов и элементов как направления повышения надежности и долговечности систем. Рассмотрены аспекты создания программного и аппаратного обеспечения процессов управления. Представлены технические характеристики топливной аппаратуры фирмы L'Orange, созданной для двигателей, выпускаемых в странах Азии. Приведено описание систем топливоподачи судовых двигателей фирм Bosch, Wartsila, Woodward, MAN-B & W, Mitsubishi Heavy Industries. Краткому анализу посвящены перспективы дальнейшего повышения давления впрыска топлива в цилиндры двигателя.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, система управления электронная, блок управления электронный, топливоподача, впрыск топлива, система топливоподачи аккумуляторная, насос высокого давления, форсунка, клапан гидравлический, рабочий процесс.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ и внедрение в конструкцию электронных систем управления процессами является самым динамично развивающимся направлением в мировом и отечественном двигателестроении. Современный поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС) невозможно представить без электронно-управляемых систем подачи топлива, изменения фаз газораспределения, наддува, сокращения выбросов вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду, утилизации и т. д. [1]. Таким образом, под программное управление электроникой переданы важнейшие процессы, протекающие в ДВС на всех эксплуатационных режимах.

Наиболее важным предметом регулирования, в основном определяющим все параметры двигателя, является система топливоподачи. Традиционно законы подачи топлива определялись конструкцией топливного насоса высокого давления (ТНВД), форсунки и профилем кулачка вала ТНВД. Однако такое управление впрыском имеет весьма ограниченные возможности. Использование быстродействующих электронно-управляемых гидравлически разгруженных клапанов в системе высокого давления топлива позволили, начиная с 1990-х гг. кардинально изменить ситуацию к лучшему. Несомненное лидерство в производстве электронно-управляемых систем топливоподачи принадлежит фирме *Bosch*, которая создала ТНВД распределительного типа VP 44 с электронным управлением впрыска и в 1996 г. запустила его в массовое производство [2]. ТНВД такого типа позволили развивать давление топлива до 90 МПа и обеспечивать высокую динамику согласования дозировки цикловой подачи топлива в каждом отдельном цикле, а также возможность независимого выбора момента начала подачи топлива от хода плунжера. Однако искажения законов подачи, неизбежно возникающие в топливных магистралях высокого давления, не позволили в полной мере реализовать возможности такого технического решения. Частично эти проблемы решались путем использования электронно-управляемых насос-форсунок, способных развивать более высокие значения давления впрыска (в перспективе до 205 МПа) с сохранением всех перечисленных преимуществ системы с электронно-управляемым насосом распределительного типа. Но создание импульса такого высокого давления было связано с нагрузками на кулачок и распределительный вал, которые провоцировали высокие износы механизма. При этом в обоих случаях на формирование закона давления подачи топлива накладывался отпечаток характера движения плунжера, определяемый профилем кулачка.

Разделить функции создания давления топлива и производства впрыска топлива в цилиндр позволяет аккумуляторная система с общей топливной магистралью высокого давления — система Common Rail (CR) (рис. 1).

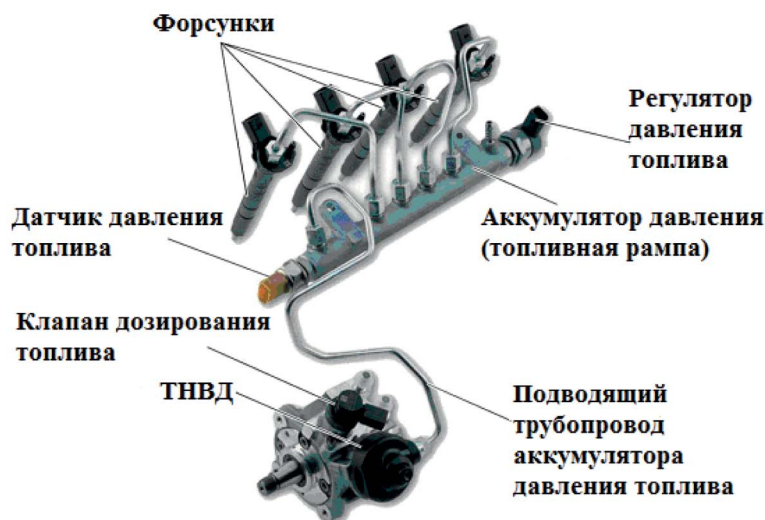


Рис. 1. Система Common Rail

В системе CR давление топлива в аккумуляторе (топливной рампе) создается вне зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя и количества впрыскиваемого топлива и может быть задано во всем рабочем диапазоне в соответствии с требованиями управления рабочим процессом. Давление в системе постоянно создается ТНВД, освобожденном от распределительной функции и работающим при низких значениях крутящего момента на приводном валу. Регулировка значений давления производится отдельным импульсным клапаном регулировки давления, находящимся под контролем электронного блока управления. В системах первого поколения давление в рампе не превышало 135 МПа, а усовершенствованная система впрыска второго поколения, принятая к массовому производству с 2001 г. развивала давление до 160 МПа [3].

Первично система CR была разработана и серийно применена для высокооборотных двигателей автотранспортного назначения малой размерности с цилиндровой мощностью от 10 до 50 кВт при 1800 – 2700 об/мин. Малые цикловые подачи топлива (порядка 0,1 г/цикл) в дизельных ДВС такого типа не выдвигают особых требований к объему аккумулятора системы, поскольку не способны вызвать ощутимых пульсаций давления топлива в рампе. Вместе с тем, относительно малый объем аккумулятора позволяет изготавливать его из доступных и недорогих материалов. Проверка и упрочнение топливной рампы производились под действием взрыва с созданием предельного давления в объеме аккумулятора до 360 МПа [4], [5].

Закон подачи топлива в аккумуляторной системе CR формируется как за счет создаваемого давления в рампе, так и за счет суммарной длительности многократного открытия форсунки, которая, в свою очередь, инициируется посредством многократной активации быстродействующего электронно-управляемого гидравлического клапана форсунки (рис. 2).

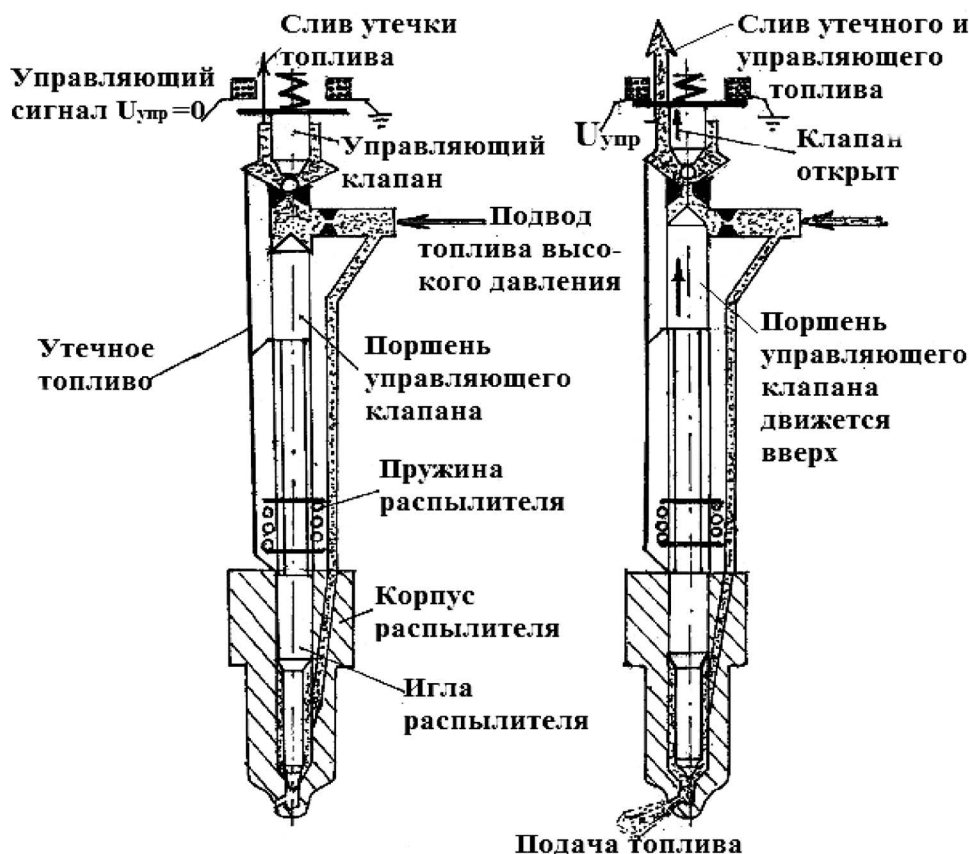


Рис. 2. Принцип действия и конструкция форсунки системы CR

Это выгодно отличает Common Rail от существующих традиционных схем топливоподачи. Вместе с тем, система CR весьма удачно вписывается в традиционную конструкцию двигателя и общую структуру электронного управления, а постоянное развитие и совершенствова-

ние свойств материалов, технологий, микропроцессорной техники и программного обеспечения позволяет все шире раскрывать ее потенциал. Такие существенные преимущества электронно-управляемой аккумуляторной системы CR предопределяют её рассмотрение как наиболее перспективной системы топливоподачи.

Дальнейшее развитие системы CR происходит одновременно в нескольких направлениях. Наибольшее внимание разработчиков уделяется совершенствованию конструкции системы. При этом такие направления, как:

- теоретические разработки в области управления рабочими процессами двигателя с системой CR;
- создание программного и аппаратного обеспечения;
- использование новых износостойких материалов в конструкции,

также являются важными для достижения высоких эксплуатационных характеристик двигателей, оснащенных аккумуляторной электронно-управляемой системой CR. Несмотря на то, что все эти направления тесно взаимосвязаны друг с другом, отдельное их рассмотрение позволяет выявить важнейшие пути совершенствования системы. Примерами реализации служат разработки упомянутой фирмы *Bosch*, фирм *Caterpillar Motoren GmbH* [6], *HEINZMANN* [7], *Duap AG* [8], *DENSO* [9], [10] и др.

При создании системы CR для судовых средне- и малооборотных дизелей с цилиндровой мощностью до 300 кВт при 720 – 1200 об/мин и цикловой подачей более 4 г/цикл обращалось внимание на флуктуации давления топлива в рампе, которые оказывают негативное влияние на параметры впрыска [11], [12]. При этом существенное увеличение объема аккумулятора для сглаживания пульсаций давления влечет за собой адекватный рост нагрузок на стенки аккумулятора, провоцирующих его разрушение. Этот факт потребовал для большеразмерных стационарных и судовых ДВС пересмотреть концепцию системы и ввести в конструкцию дополнительные индивидуальные аккумуляторы для каждой форсунки (группы форсунок) [13]. Примером такой форсунки — сердца новой системы впрыска Common Rail — является её разработка фирмой *L'Orange* в тесном сотрудничестве с *MTU* [14], [15] для двигателей серии 1163. Последние были разработаны в начале 1980-х гг., и сегодня представлены на рынке в третьем поколении. В первую очередь он был разработан для военно-морского использования. Но с развитием паромного бизнеса в середине 1990-х гг. конструкция двигателя в 1994 г. была улучшена, чтобы справиться с чрезвычайно высокой нагрузкой высокоскоростных паромов, и сегодня отличается малой удельной массой. В четвертом поколении, с начала серийного производства в августе 2013 г., двигатель отвечает требованиям законодательства по нормам выбросов вредных веществ с отработавшими газами IMO II. Это позволило компании в полной мере использовать потенциал системы впрыска топлива в сочетании с другими ключевыми технологиями для переработки процесс горения.

Наряду с давлением впрыска, которое влияет на расход топлива и выбросы, важным является закон впрыска [16], [17]. Закон впрыска определяет, когда и сколько топлива впрыскивается в цилиндр. Для того чтобы уменьшить выбросы и расход топлива на данном этапе эволюции системы впрыска для двигателей MTU, предлагается делить последовательность впрыска топлива на три отдельные фазы (рис. 3) [18], [19]. Основная фаза впрыска топлива определяет мощность двигателя. Предварительная фаза впрыска инициирует раннее сгорание, чтобы обеспечить контролируемое горение топлива в основной фазе впрыска.

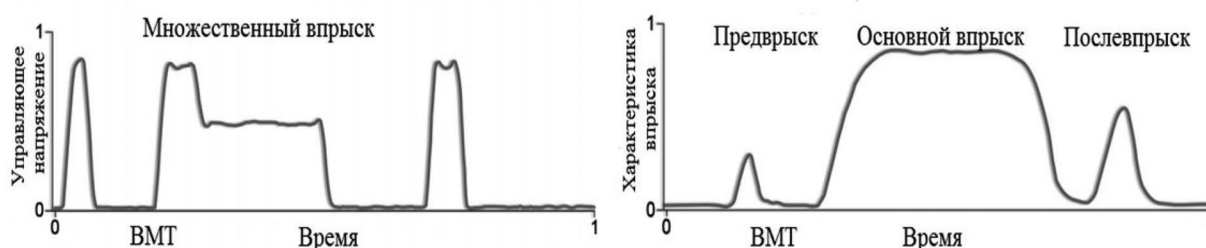


Рис. 3. Расход топлива и дробление впрыска

Это уменьшает выбросы оксидов азота, так как более плавное протекание процесса тепло-выделения, происходящее в этом случае, предотвращает достижение высоких температур в цикле дизельного двигателя. Фаза послевпрыска, следующая непосредственно после основной фазы впрыска топлива, снижает выбросы твердых частиц за счет более полного перемешивания топлива и воздуха во время поздней фазы сгорания (фазы догорания). Одновременные турбулизация заряда и повышение температуры фазы догорания способствуют окислению сажи. Таким образом, в зависимости от режима работы двигателя, основная фаза впрыска топлива может быть дополнена фазами предвпрыска и (или) послевпрыска — в зависимости от требуемых условий организации внутрицилиндровых процессов. Подобные работы по совершенствованию конструкции с целью повышения эксплуатационных характеристик были выполнены для двигателя MTU 4000.

Для достижения намеченных целей одной из основных мер было изменение системы впрыска топлива. До сих пор двигатель был оснащен обычной системой Насос-Трубопровод-Форсунка (Pump Line Nozzle – PLN), ограниченной в своей функциональности. Она была заменена системой впрыска Common Rail с современной форсункой *L'Orange*. Преимуществами системы Common Rail перед системой PLN являются: а) давление впрыска постоянно доступно почти во всем диапазоне скоростей; б) свободный выбор закона впрыска. Это означает, что возможен выбор идеального момента впрыска и количества впрыскиваемого топлива во всем поле рабочих режимов двигателя. Сравнение двух систем топливоподачи приведено на рис. 4.

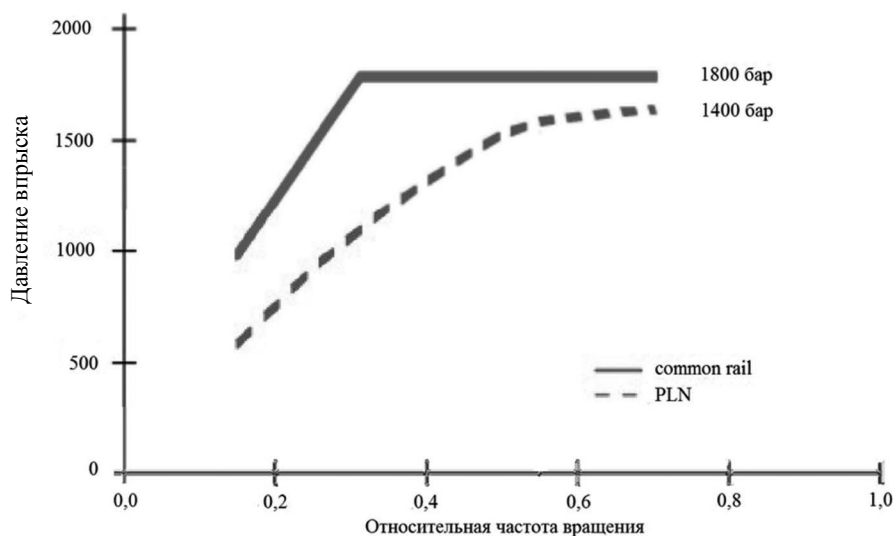


Рис. 4. Сравнение возможностей систем топливоподачи PLN – Common Rail

Половина времени из трех лет с начала реализации проекта до начала производства в процессе совершенствования двигателей новой серии MTU 4000 была уделена созданию новой форсунки LEAD2. Акцент был сделан на использование стандартных деталей и конструктивных особенностей. Базой явилась форсунка серии MTU 4000, которая производится в больших количествах, уже используется в третьем поколении двигателей и постоянно совершенствуется для достижения целевых показателей выбросов и повышения стойкости к износу (рис. 5).

Для достижения требуемого мгновенного роста впрыска (примерно в четыре раза выше, чем для серии MTU 4000) потребовалось совершенствование геометрии каналов форсунки (рис. 6).

Применение форсунок со встроенным топливным резервуаром предотвращает колебания давления в рампе системы и, следовательно, мгновенные дефицит или избыток подачи топлива к форсункам.

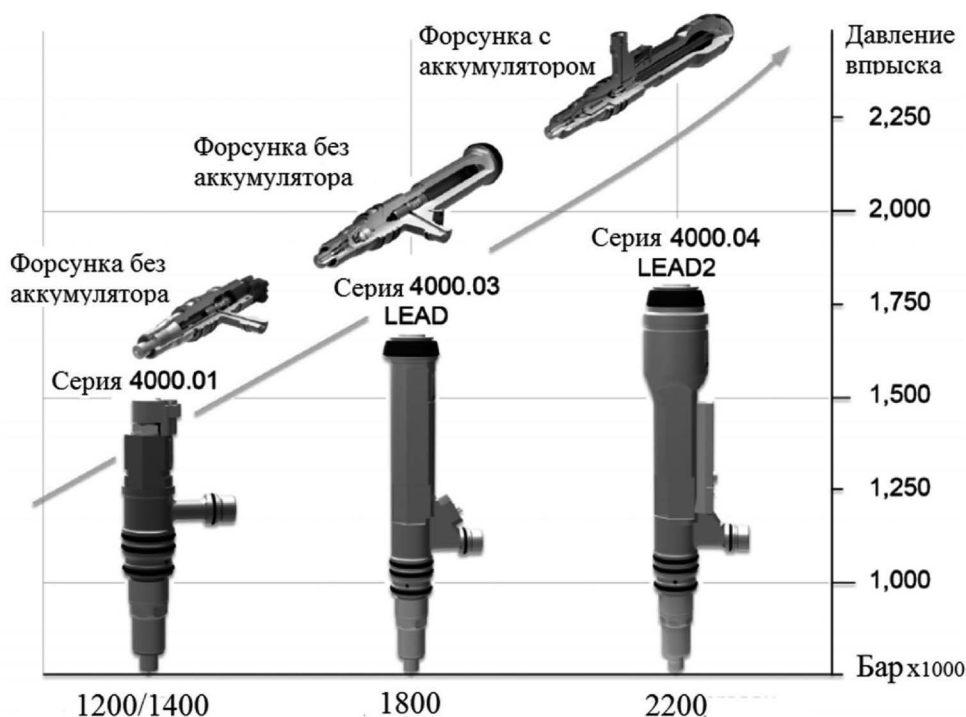


Рис. 5. Изменение давления впрыска двигателей серии 4000 с 1996 г. по настоящее время

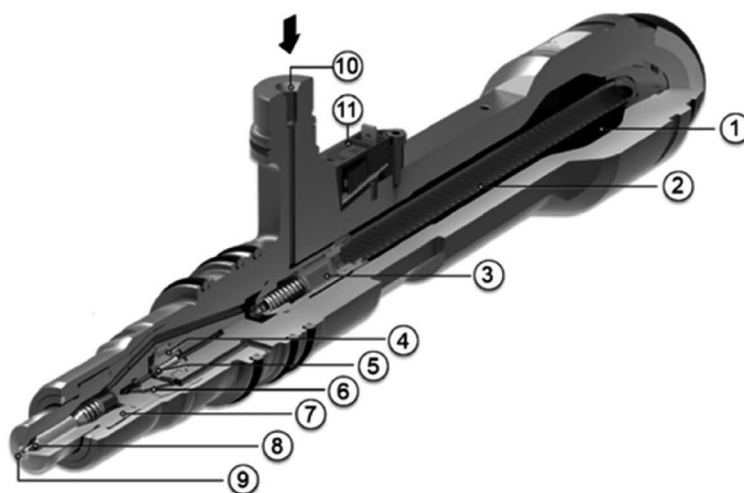


Рис. 6. Форсунка LEAD2 L'Orange со встроенным топливным аккумулятором давления:

- 1 — аккумулятор; 2 — фильтр; 3 — ограничительный клапан;
4 — электромагнит актюатора; 5 — управляющий клапан; 6 — каналы управления;
7 — элемент распылителя, изготовленный из стали с высокой термостойкостью; 8 — игла распылителя;
9 — распылитель; 10 — подвод топлива высокого давления; 11 — электрический разъем

Одной из целей являлась возможность множественного (многофазного) впрыска. Аккумулятор в форсунке позволяет снизить пульсации давления по сравнению с обычным, общим для всех форсунок аккумулятором. Это приводит к возможности увеличения давления в системе, повторяемости и стабильности давления и количества впрыска для реализации распределенного впрыска. Аккумулятор, как и все топливные каналы и трубопроводы, был разработан для максимального количества впрыска в 3100 мм^3 и гидравлического расхода сопла в 15 л/мин. Хотя двигатель пока работает с давлением в системе 1600 бар, аккумулятор и форсунка были разработаны для давле-

ния 1800 бар. Кроме того, наряду с внедрением в корпус форсунки LEAD2 аккумулятора давления форсунка снабжена модифицированным блоком управления. Блок управления не только обеспечивает производительность обновленных форсунок, но также вносит значительный вклад в стабильность параметров форсунки в течение 6000 часов работы.

Похожие технические решения при разработке форсунки со встроенным аккумулятором для системы топливоподачи моторного топлива были приняты итальянской фирмой *OMT* [20], [21]. Об этом свидетельствует вид представленной разработчиками форсунки (рис. 7).

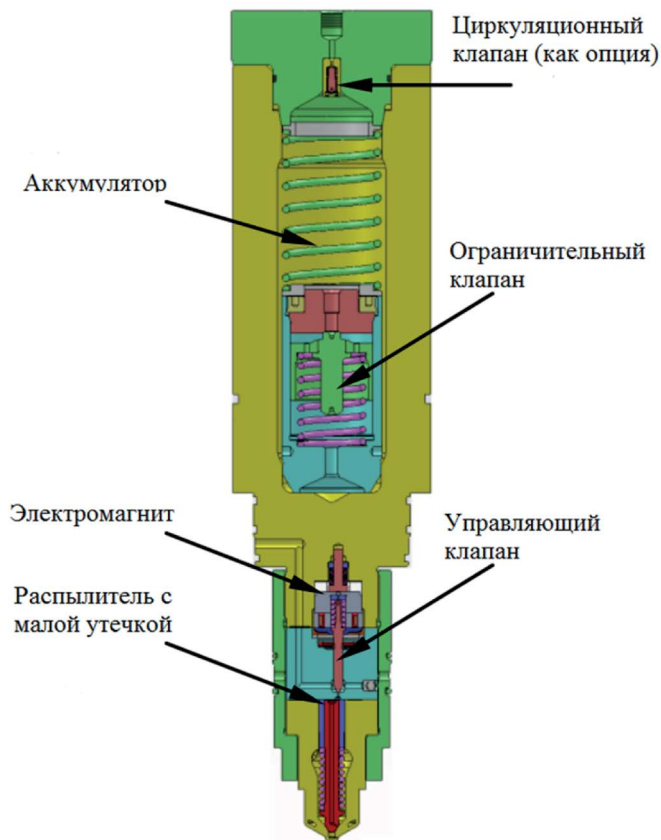


Рис. 7. Форсунка *OMT* со встроенным топливным аккумулятором давления

Форсунка содержит встроенный аккумулятор, а также ограничительный клапан для защиты двигателя в случае отказа форсунки. Обеспечивается множественный впрыск топлива для обеспечения максимальной гибкости в формировании кривой тепловыделения. Это достигнуто путем разработки блока управления, способного работать при высокой температуре мазута и помещенного очень близко к игле форсунки для минимизации времени её срабатывания и времени выдержки между впрысками. Этой концепции отвечает и конструкция электромагнита, способного удовлетворить высокие требования к времени переключения, работоспособности (сила при перемещении клапана) при ограниченных размерах и высоких рабочих температурах.

В целях обеспечения унификации, для комплектования системой Common Rail целого модельного ряда дизелей, объединяющих в конструкции 6, 8, 12, 16 и более цилиндров, предлагается построение системы CR по модульному принципу [22]. Такое конструкторское решение позволяет повысить стабильность параметров и облегчает конструирование системы. Решение оказалось столь удачным, что практически все основные производители судовых двигателей в своих конструкциях используют модульные системы CR. Так, например, известны работы по созданию модульной электронно-управляемой аккумуляторной системы впрыска семейства двигателей фирмы *MAN-B & W* размерности 32/44 с цилиндровой мощностью 560 кВт [23], [24] и числом цилинд-

ров от 6 до 10 — рядной конструкции и от 12 до 20 — для V-образной. Так же известны работы фирм *Sulzer* (двигатели типа RT-flex) [25], [26], *Mitsubishi Heavy Industries* (двигатель MARK-30B) [27], [28] и др. С модульным принципом построения систем CR на рынок судовых ДВС вышла и фирма *Bosch*. С использованием значительного накопленного опыта создания, производства и эксплуатации систем для большегрузной автотранспортной техники была создана и сертифицирована конструкция системы MCRS-22-HFO для двигателей с цилиндровой мощностью от 100 до 350 кВт и числом цилиндров от 4 до 20 [29], [30]. Разработчик систем CR для судовых двигателей, выпускаемых странами тихоокеанского региона, фирма *L'Orange GmbH* также в своих поисках оптимальной конфигурации системы пришла к модульному принципу ее построения [31]. Совместно с двигателестроительной фирмой *Jinan Diesel Engine Co., Ltd.* фирмой разработаны две новых модели двигателей с системой Common Rail – JDEW 175 CR и JDEW 260 CR.

Особые трудности в организации работы системы CR вызывает работа на тяжелых видах топлива. Для реализации такой возможности фирмой *Woodward*, специально для среднеоборотных двигателей *Wartsila 16V46D-CR*, была разработана модульная система LCR (большая Common Rail) с возможностью обслуживания до 18 цилиндров (рис. 8) [32]. Конструкция LCR предусматривает возможность циркуляции топлива в трубопроводах после остановки двигателя, а топливные форсунки используют в электрогидравлической системе не топливо, а сервомасло.

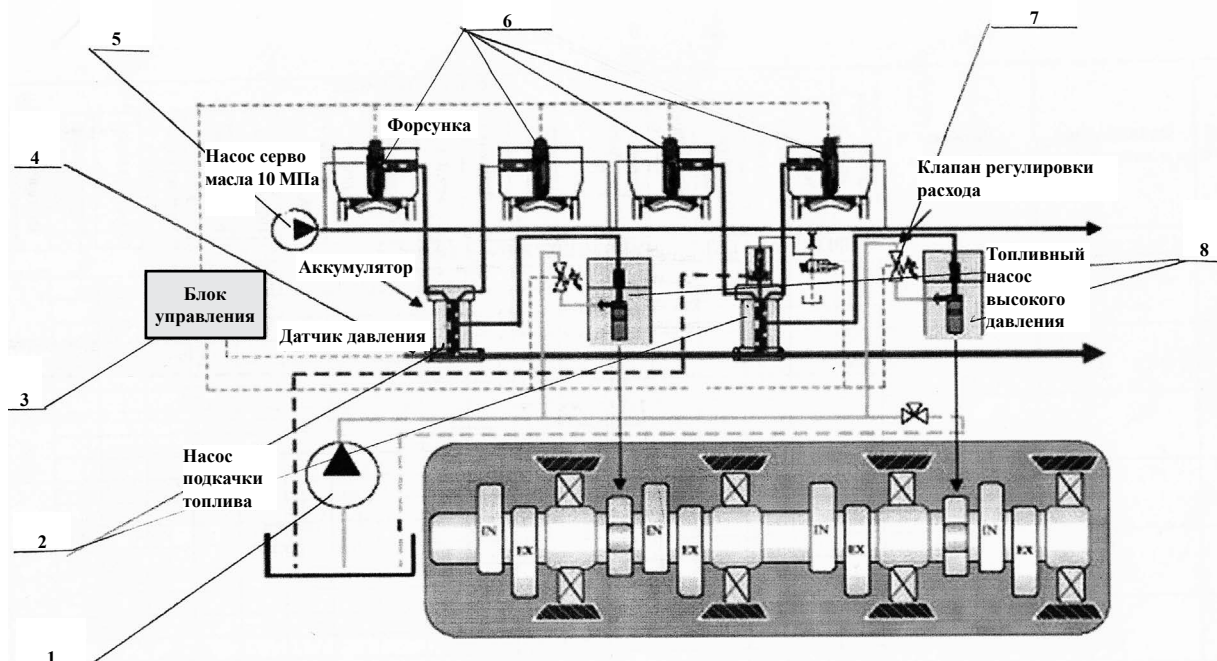


Рис. 8. Устройство системы LCR Woodward – Wartsila

- 1 — топливopодкачивающий насос; 2 — аккумулятор давления топлива; 3 — блок управления;
4 — датчик давления топлива; 5 — насос сервомасла 10 МПа; 6 — форсунка;
7 — клапан регулировки расхода топлива; 8 — топливный насос высокого давления

Привод топливного насоса высокого давления системы осуществляется от индивидуальных кулачков, размещенных на распределительном вале газораспределительного механизма. На начальном радиусе кулачков привода каждого ТНВД скомпонованы по два кулачка, что позволяет увеличить производительность насоса высокого давления и, благодаря специальному профилю, максимально снизить нагрузки на распределительный вал механизма газораспределения. Аккумуляторы LCR питают форсунки двух соседних цилиндров и соединены общей топливной рампой. Форсунки с электромагнитным управлением обеспечивают закон подачи, угол опережения и объем топлива, соответствующие режиму работы двигателя (по частоте вращения коленчатого вала и крутящему моменту). Таким образом, достигается оптимизация процесса сгорания с целью

получения максимальной топливной экономичности при одновременной минимизации вредных выбросов с отработавшими газами. Похожие конструкции модульных систем получают развитие и у других производителей.

Очевидно, что высокие механические и термические нагрузки, возникающие в деталях системы CR, сокращают ресурсные показатели и предъявляют повышенные требования к материалам, используемым в конструкции. Самыми уязвимыми узлами в этом отношении являются распылители форсунок (износ запорного конуса и направляющей поверхности иглы, размывание отверстий распылителя) и узел быстродействующего управляющего клапана форсунки [12]. Повышение длительной работоспособности элементов конструкции системы Common Rail с одновременным снижением себестоимости изделий может быть достигнуто различными методами. Наряду с методами, предусматривающими усовершенствование конструкции, в качестве наиболее перспективного направления рассматривается использование в конструкции новых, нетрадиционных для отрасли материалов, способных значительно повысить работоспособность деталей. Проблема абразивной эрозии клапана форсунки эффективно решается с использованием более твердых деталей из безоксидной керамики. Известны работы по изготовлению клапана с использованием нитрида кремния и седла из карбида вольфрама для седел клапанов также используется карбид титана [33] – [35]. Использование керамических конструкционных материалов обеспечивает увеличение ресурса работы узла практически на порядок. Для повышения жаропрочности тяжело нагруженных узлов, возможно применение теплоизоляционных покрытий из оксидной и безоксидной керамики (например, частично стабилизированного диоксида циркония).

Интересным представляется направление работ по использованию вместо электромагнитных управляющих клапанов форсунок CR клапанов, использующих в своей основе эффекта пьезокристалла [36] – [39]. Использование в конструкции форсунки пьезоэлемента (рис. 9) позволяет значительно увеличить её быстродействие и, следовательно, обеспечивает широкие возможности по управлению законом впрыска топлива. Кроме того, такое решение упрощает конструкцию и снижают себестоимость изделия.

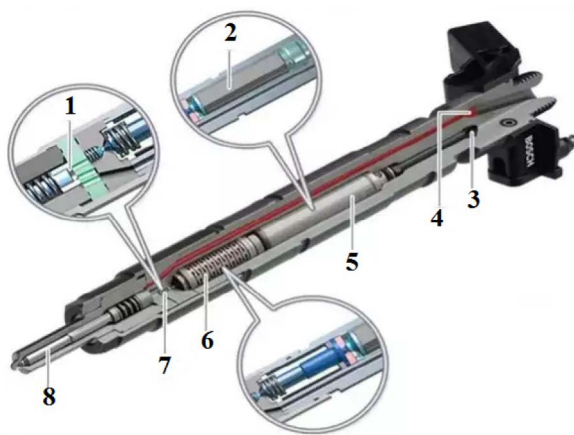


Рис. 9. Конструкция пьезоэлектрической форсунки:

- 1 — управляющая камера; 2 — пьезоэлемент; 3 — канал возврата топлива утечки и управляющего топлива;
4 — канал подвода топлива высокого давления; 5 — силовой модуль; 6 — управляющий модуль;
7 — переключающий клапан; 8 — игла распылителя

Можно предположить, что дальнейшие усилия по улучшению параметров стабильности и долговечности конструкции откроют перспективы для более массового использования пьезоэлектрических форсунок.

Создание эффективно работающих систем CR и выполнение постоянно ужесточающихся требований ИМО, TIER и др. становится невозможным без глубоких теоретических проработок физических явлений, связанных с организацией высокоэкономичного и экологически безопасного рабочего процесса дизельного ДВС. Программное обеспечение электронного блока управления дви-

гателем предусматривает использование полуэмпирических математических моделей, на основании которых формируется функция управления процессами. Исходя из этого, в качестве одного из перспективных направлений развития систем CR следует рассматривать совершенствование моделей управления впрыском и сгоранием топлива и, связанной с этим, разработки программного обеспечения управления процессами. Примером постоянного совершенствования процессов управления может служить тот факт, что первые промышленные образцы системы CR первого поколения имели весьма скромные возможности электронной адаптации структурных элементов при их замене, что вызывало массу проблем в эксплуатации и ремонте. Так, например, при замене форсунки, для учета технологических неточностей изготовления, требовалось ее прописывание в память электронного блока управления дилерским сканером. Этот существенный недостаток первого поколения системы в дальнейшем был устранен, и в программном обеспечении CR следующих поколений функция адаптации заменяемых структурных элементов системы была расширена [4].

Исследования процесса управления впрыском топлива в цилиндр и, связанного с ним, закона тепловыделения в цикле являются основополагающими в построении алгоритмов управления системой. В этом плане интересны работы, проведенные *Mitsubishi Heavy Industries* [27], [28], по формированию концепции «башмачного» впрыска (название принято из подобию внешнего вида характеристики подачи соответствующей обуви). Как отмечают авторы, обычная система Common Rail обеспечивает закон впрыска, близкий к прямоугольному, что приводит к большим скоростям тепловыделения на стадии кинетического сгорания и, как следствие, к росту эмиссии NO_x . Различия между обычным и «башмачным» впрыском заключается в оптимизации длительности последнего в целях обеспечения «мягкого» сгорания, т. е. медленного повышения давления и температуры в цикле с сохранением общей динамики тепловыделения. Для этого предложенная система предусматривает раздельное задание уровней высокого и низкого давления топлива (180 и 60 МПа соответственно). Таким образом, первая фаза топливоподачи производится при низком уровне давления топлива (запальная порция), а вторая — основная — при высоком давлении. В результате при «башмачном» впрыске сокращается скорость нарастания и уровень температуры в цикле, что обеспечивает снижение эмиссии NO_x примерно на 20 % без потери экономичности двигателя. Важное значение для достижения высоких требований стандарта Tier 3 (с 2016 г.) и, в перспективе, Tier 4 имеет дальнейшее увеличение давлений топливоподачи, развиваемые в аккумуляторах системы CR.

Каковы пределы повышения давления впрыска и существуют ли они?

Повышение давления подачи топлива способно увеличить дисперсность распыливания топлива, угол раскрытия топливного факела и, в результате, позволяет более полно использовать свежий заряд цилиндра в процессе сгорания. Эти явления способствуют сокращению эмиссии несгоревших углеводородов, сажи и оксидов азота с отработавшими газами современных дизельных двигателей. Поэтому основные производители систем CR выявляют тенденцию к постоянному росту давления в системе (рис. 10), согласно [40], [41].

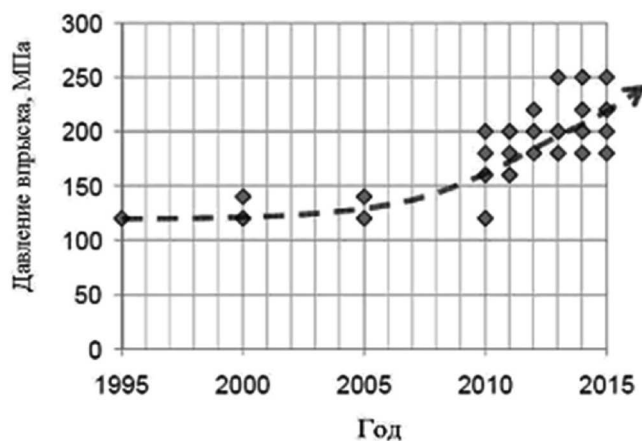


Рис. 10. Изменение давления впрыска в системах Common Rail

Очевидно, что с ростом давления впрыска растет дальнобойность факела, а тонкость распыла топлива повышается, но до определенного предела «насыщения», когда рост давления впрыска уже не оказывает прежнего влияния на дисперсность распыливания. Авторами в качестве определяющего параметра принята дальнобойность факела. Методика исследования, позволяющая оценить влияние повышения давления впрыска, основывается на оценке дальнобойности факела в результате превышения давления впрыска над давлением в камере сгорания. Тогда при одинаковом коэффициенте избытка воздуха дальнобойность факела может быть увеличена как за счет повышения давления впрыска, так и за счет снижения давления газов в цилиндре.

Второй путь означает сокращение длительности впрыска. Целью авторов работы было оценить минимальный уровень высокого давления впрыска, при котором снижение давления в цилиндре для сохранения дальнобойности факела не требуется. Для этого вводится понятие «приведенного давления впрыска». При этом авторы [40] на основании проведенного комплекса экспериментально-теоретических исследований приводят данные по сокращению дымности работы двигателя с ростом давления впрыска при различных давлениях в цилиндре в конце сжатия (рис. 11).

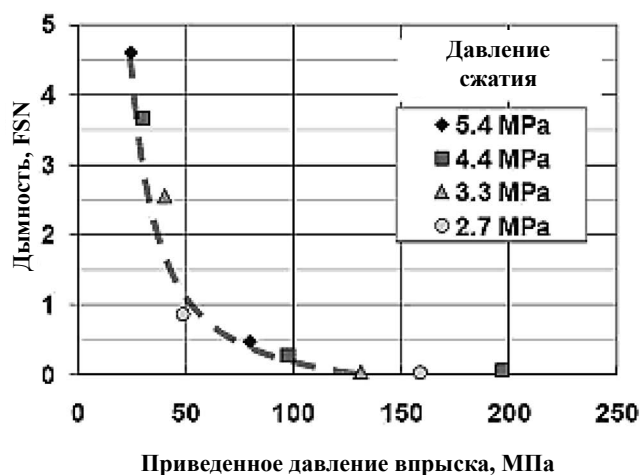


Рис. 11. Соотношение между «приведенным давлением впрыска» и сажеобразованием

В заключение необходимо отметить, что изложенные тенденции совершенствования систем CR:

- развитие конструкции с использованием модульного принципа;
- внедрение в конструкцию современных, в том числе, керамических конструкционных материалов;

- совершенствование программного обеспечения и проведение теоретических исследований процессов управления параметрами рабочего процесса,

являясь определяющими направлениями, далеко не исчерпывают полный перечень перспективных путей совершенствования CR, подробное рассмотрение которых выходит за рамки данной работы и могут являться предметом отдельного рассмотрения.

Выводы

Среди всего многообразия конструкций топливоподающих систем дизельных двигателей, аккумуляторная электронно-управляемая, самонастраиваемая система CR может рассматриваться как наиболее перспективная, способная обеспечить как высокую топливную экономичность, так и жесткие требования экологических стандартов.

Принимая во внимание специфику устройства и программы выпуска дизельных двигателей судового назначения, развитие конструкций систем CR для упомянутого и схожих типов двигателей происходит на основе модульного принципа построения с созданием индивидуальных топливоаккумулирующих объемов для каждого цилиндра (группы цилиндров), при этом аккумулятор давления может быть интегрирован в конструкцию самой топливоподающей форсунки.

В целях обеспечения требуемых ресурсных показателей при одновременном снижении себестоимости самых уязвимых в этом отношении узлов и системы СР в целом, широкое распространение получают конструкции с использованием керамических конструкционных материалов.

Важным этапом на пути дальнейшего совершенствования аккумуляторных систем топливоподачи является проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов впрыска (в том числе, под сверхвысоким давлением — свыше 250 МПа) топлива и тепловыделения в камере сгорания дизельного двигателя, направленных на построение точных моделей управления внутрицилиндровыми процессами, способных обеспечить достижение требований стандартов Tier 3 и, в перспективе — Tier 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А. П. Развитие электронных систем управления судовыми двигателями внутреннего сгорания / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 152–169.
2. Казедорф Ю. Системы впрыска дизельных двигателей: пер. с нем. ООО «СтарСПб» / Ю. Казедорф, Э. Войцетшлегер. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2012. — 320 с.
3. Гюнтер Г. Диагностика дизельных двигателей. Серия «Автомеханик»: пер. с нем. Ю. Г. Грудского / Г. Гюнтер. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. — 176 с.
4. Системы управления дизельными двигателями / пер. с нем. С40. Первое русское издание. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. — 480 с.
5. Мельник Г. В. Обзор докладов по системам «Common Rail» на конгрессе CIMAC-2004, Киото / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2006. — № 2. — С. 44–52.
6. Caterpillar Common Rail. Catalog. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://pdf.nauticexpo.com/pdf/caterpillar-marine-power-systems/caterpillar-common-rail/19997-40609.html> (дата обращения: 29.10.2015).
7. Haas S. Introduction of the Caterpillar Common Rail on M32 engine family — Operational experience / S. Haas // Ship&Offshore / Schiff&Hafen. — 2010. — N. 3. — Pp. 37–38.
8. Heller M. The new HEINZMANN Common-Rail and EFI Engine Control System for medium-speed and high-speed engines / M. Heller, A. Jaufmann // Ship & Offshore. — 2010. — N 3. — Pp. 88–89.
9. Vogt E. Economical and technical aspects of DUAP's fuel Injection parts and systems. [Электронный ресурс] / E. Vogt, S. Jung, M. Poletti. — Режим доступа: http://www.duap.ch/wp-content/uploads/2013/07/paper131_cimac_2010.pdf (дата обращения: 22.01.2015).
10. Matsumoto S. Concepts and Evolution of Injector for Common Rail System / S. Matsumoto, K. Yamada, K. Date. — SAE Technical Paper, 2012. — № 2012-01-1753. DOI: 10.4271/2012-01-1753.
11. Matsumoto S. 4th Generation Diesel Common Rail System: Realizing Ideal Structure Function for Diesel Engine / S. Matsumoto, C. Klose, J. Schneider, N. Nakane, D. Ueda, S. Kondo. — SAE Technical Paper, 2013. — № 2013-01-1590. DOI: 10.4271/2013-01-1590.
12. Jay D. Common rail experiences & new developments — 4-stroke Wärtsilä engines / D. Jay, A. Järvi, K. Ehrstrom // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 1040–1056.
13. Jay D. C. Latest fuel injection systems on medium speed engines used for IMO tier 3 requirements in 2016 / D. C. Jay, D. Delneri, F. Cavressi // Fuel Systems for IC Engines. — 2012. — Pp. 89–102. DOI:10.1533/9780857096043.4.89.
14. Иванов М. Ю. Современные средне- и высокооборотные дизели с электронными системами управления / М. Ю. Иванов, В. А. Шишкин, А. П. Петров // Двигателестроение. — 2006. — № 4. — С. 40–45.
15. Senghaas C. New Heavy Fuel Oil Injection System / C. Senghaas, H. Schneider, S. Reinhard, D. Jay, K. Ehrstroem // MTZ worldwide eMagazine. — January 2011 — Volume 72 — Issue 1 — pp. 10–15.
16. Senghaas C. New platform based Common Rail Injector for MTU series 1163. [Электронный ресурс] / C. Senghaas, M. Ligensa, K. Reischmann. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 15.09.2013).
17. Rabe R. Fuel injection strategies for heavy fuel medium speed engines to comply with future emission limits / R. Rabe, M. Epp, C. Fink, H. Harndorf, E. Hassel // Ship & Offshore. — 2010. — № 3. — Pp. 66.

18. *Fink C.* Hydraulic measures to improve common-rail injection system performance — Impact of injection rate shaping on emissions of a medium speed diesel engine. [Электронный ресурс] / C. Fink, M. Dresche, J. R. Rabe, H. Harndorf. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 23.02.2015).
19. *Kech J.* Common Rail Fuel Injection: Key technology for clean and economical combustion. [Электронный ресурс] / J. Kech, M. Willmann, P. Gorse, M. Boog. — Режим доступа: http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/white-papers/3100651_MTU_General_WhitePaper_CommonRail_2011.pdf (дата обращения: 22.11.2014).
20. *Heim K.* Advanced Common Rail Injection for Medium Speed Engines / K. Heim, M. Coppo // MTZ industrial. — 2013. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 28–35.
21. *Coppo M.* Advanced HFO Common Rail Injector for Maximising the Performance of Medium Speed Engines. [Электронный ресурс] / M. Coppo, C. Negri, K. Heim, A. Banno. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 02.12.2013).
22. *Brunner H.* Common Rail Wäertsilä 2-Stroke Engines in Practice / H. Brunner, M. Betschart, S. Fankhauser // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 995–1009.
23. *Vogel C.* The new MAN 32/44 CR — efficient, clean and compact / C. Vogel, G. Heider, S. Haas, A. Marzinek // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 36–46.
24. New HFO Common Rail System for Medium speed Diesel Engines. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://docslide.us/documents/man-common-rail-cimac1.html> (дата обращения: 19.02.2014).
25. *Шишкин В. А.* Развитие двухтактных малооборотных ДВС с электронным управлением / В. А. Шишкин, А. П. Петров, М. Ю. Иванов // Двигателестроение. — 2006 — № 2. — С. 26–31.
26. *Heim K.* Latest developments of Wäertsilä low-speed engines to meet current and future customer demands / K. Heim // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 10–23.
27. *Sugihara M.* Creating a Whole Range of Benefits with the MITSUBISHI UEC Eco-Engine / M. Sugihara, K. Edo, T. Tanida // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 1009–1019.
28. *Hiraoka N.* Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine / N. Hiraoka, K. Imanaka. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 22.08.2013).
29. *Kendlbacher C.* The 2200 bar Modular Common Rail Injection System for Large Diesel and HFO Engines. [Электронный ресурс] / C. Kendlbacher D. Blatterer, M. Bernhaupt. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 20.02.2015).
30. *Rehbichler G.* The Bosch Electronic Diesel Control System for Medium and High Speed Engines. [Электронный ресурс] / G. Rehbichler, C. Kendlbacher, M. Bernhaupt. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 22.05.2014).
31. *Heller M.-T.* L'Orange Fuel Injection Systems in China & Asia -Past Experience, Today's Expertise and Examples for Tomorrow's Excellence. [Электронный ресурс] / M.-T. Heller, T. Stelzer, M. Riegert, S. Li. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 22.11.2015).
32. Result Type 51223 — Energy Control Technologies on the Queen Mary 2. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.woodward.com/searchpublications.aspx> (дата обращения: 20.07.2014).
33. *Батаев А. А.* Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. — 383 с.
34. *Батаев А. А.* Композиционные материалы / А. А. Батаев, В. А. Батаев. — М.: Логос, Университетская книга. Серия Новая университетская библиотека, 2006. — 400 с.
35. Машиностроение: Энциклопедия: в 40 т. Технология производства изделий из композиционных материалов, пластмасс, стекла и керамики. — Т. 3 – Т. 6. — М.: Машиностроение, 2006.
36. Дизельные аккумуляторные топливные системы COMMON RAIL (Bosch). — М.: Легион-Автодата, 2010. — 94 с.
37. *Oki M.* 180MPa Piezo Common Rail System / M. Oki, S. Matsumoto, Y. Toyoshima, K. Ishisaka. — SAE Technical Paper. — № 2006-01-0274. DOI: 10.4271/2006-01-0274.

38. Oh B. Development of an Injector Driver for Piezo Actuated Common Rail Injectors / S. Oh, K. Lee, M. Sunwoo. — SAE Technical Paper. — № 2007-01-3537. DOI: 10.4271/2007-01-3537.
39. Lazarev V. A Method for the Estimation of the Service Life of a Precision Guiding Interface “Needle - Nozzle Body” of a Common-Rail-Injector for High Rail Pressures / V. Lazarev, J. Wloka, G. Wachtmeister. — SAE Technical Paper. — № 2011-01-2020. DOI:10.4271/2011-01-2020.
40. Minamino R. Fuel injection concept for the future clean diesel engines / R. Minamino, T. Kawabe, H. Omote, S. Okada // Schiff & Hafen / Ship & Offshore. — 2013. — Special. — Pp. 8–9.
41. Развитие систем топливоподачи дизельных двигателей (материалы конгресса СИМАС 2013) // Двигателестроение. — 2014. — № 4. — С. 46–57.

STATUS AND PROSPECTS OF PERFECTION OF FUEL SUPPLY SYSTEM COMMON RAIL

Modern piston internal combustion engine can not be imagined without fuel systems with electronic control, variable valve timing, turbocharging, etc. Thus, under software control electronically transferred most important processes in the internal combustion engine at all operating conditions.

This article focuses on reviewing the establishment and development of battery systems, high-pressure fuel. It is shown that the required pressure and the required level of fuel injection characteristics can be provided by modern systems c electronically controlled type Common Rail. The introduction of these systems as a way to improve fuel economy and increase of ecological safety of diesel plants, caused a necessity. Showing progress in terms of development and organization of the high-pressure fuel for engines of various capacities, selection of appropriate materials for the components and elements as the direction of increasing the reliability and durability of the systems. Aspects of the creation of hardware and software management processes. Specifications of the fuel equipment company «L'Orange», created for the engines produced in Asia. The description of the fuel system of marine engines companies Bosch, Wartsila, Woodward, MAN B & W, Mitsubishi Heavy Industries. Devoted to a brief analysis of the prospects for further increasing the pressure of fuel injection into the cylinders of the engine.

Keywords: internal combustion engine, electronic control system, electronic control unit, fuel supply, fuel injection, fuel accumulator system, high-pressure pump, injector, hydraulic valve, workflow.

REFERENCES

1. Petrov, A. P., and G. E Zhivlyuk. “Development of electronic control systems of internal combustion engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 152–169.
2. Kazedorf, U., and E. Voyzeshleger. *Sistemy vpryska dizelnyh dvigatelej*. M.: ZAO “KZHI” Za rulem”, 2012.
3. Gunther, G. *Diagnostika dizelnyh dvigatelej. Seriya «Avtomehanik»*. M.: ZAO “KZHI” Za rulem”, 2004.
4. *Sistemy upravleniya dizelnymi dvigateljami*. M.: ZAO “KZHI” Za rulem”, 2004.
5. Melnik, G. V. “Obzor dokladov po sistemam «Sommon Rail» na kongresse SIMAC-2004, Kioto.” *Dvigatelsestroenie* 2 (2006): 44–52.
6. Caterpillar Common Rail. Catalog. Web. 29 Nov. 2015 <<http://pdf.nauticexpo.com/pdf/caterpillar-marine-power-systems/caterpillar-common-rail/19997-40609.html>>.
7. Haas, Stefan. “Introduction of the Caterpillar Common Rail on M32 engine family - Operational experience.” *Ship&Offshore/Schiff&Hafen* 3 (2010): 37–38.
8. Heller, Marc-Tran, and Alexander Jaufmann. “The new HEINZMANN Common-Rail and EFI Engine Control System for medium-speed and high-speed engines.” *Ship&Offshore/Schiff&Hafen* 3 (2010): 88–89.
9. Vogt, Erich, Steffen R. Jung, and Marco Poletti. Economical and technical aspects of DUAP’s fuel Injection parts and systems. Web. 22 Jan. 2015 <http://www.duap.ch/wp-content/uploads/2013/07/paper131_cimac_2010.pdf>.
10. Matsumoto, Shuichi, Koichi Yamada, and Kenji Date. *Concepts and Evolution of Injector for Common Rail System*. No. 2012-01-1753. SAE Technical Paper, 2012. DOI: 10.4271/2012-01-1753
11. Matsumoto, S., C. Klose, J. Schneider, N. Nakane, D. Ueda, and S. Kondo. *4 th Generation Diesel Common Rail System: Realizing Ideal Structure Function for Diesel Engine*. No. 2013-01-1590. SAE Technical Paper, 2013. DOI: 10.4271/2013-01-1590.

12. Jay, David, Arto Jaervi, and Kenneth Ehrstrom. "Common rail experiences & new developments — 4-stroke Wärtsilä engines." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 1040–1056.
13. Jay, David C., D. Delneri, and F. Cavressi. "Latest fuel injection systems on medium speed engines used for IMO tier 3 requirements in 2016." *Fuel Systems for IC Engines* (2012): 89–102. DOI:10.1533/9780857096043.4.89.
14. Ivanov, M. Yu, V. A. Shishkin, and A. P. Petrov. "Present-Day Mid- & High-Speed Diesel Engines Featuring Electronic Controls." *Dvigatelsestroyeniye* 4 (2006): 40–45.
15. Senghaas, Clemens, Schneider Hartmut, Reinhard Steffen, Jay David and Ehrstroem Kenneth. "New Heavy Fuel Oil Injection System." *MTZ worldwide eMagazine* January 72.1 (2011): 10-15.
16. Senghaas, Clemens, Marius Ligensa, and Klaus Reischmann. New platform based Common Rail Injector for MTU series 1163. Web. 15 Sept. 2013 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
17. Rabe, R., M. Epp, C. Fink, H. Harndorf, and E. Hassel. "Fuel injection strategies for heavy fuel medium speed engines to comply with future emission limits." *Ship&Offshore* 3 (2010): 66. http://www.ihr-omagazin.de/eMags/emags_online_demo/ship_2010/index.html#66.
18. Fink, C., M. Dresche, J. R. Rabe, and H. Harndorf. Hydraulic measures to improve common-rail injection system performance - Impact of injection rate shaping on emissions of a medium speed diesel engine. Web. 23 Feb. 2015 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
19. Kech, J., M. Willmann, P. Gorse, and M. Boog. Common Rail Fuel Injection: Key technology for clean and economical combustion. Web. 22 Nov. 2014 <http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/white-papers/3100651_MTU_General_WhitePaper_CommonRail_2011.pdf>.
20. Heim, K., and M. Coppo. "Advanced Common Rail Injection for Medium Speed Engines." *MTZ industrial* 3.2 (2013): 28–35.
21. Coppo, Marco, Claudio Negri, Klaus Heim, and Alessio Banno. "Advanced HFO Common Rail Injector for Maximising the Performance of Medium Speed Engines." Web. 12 Dec. 2013 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
22. Brunner, Heinrich, Michael Betschart, and Stefan Fankhauser. "Common Rail Wärtsilä 2-Stroke Engines in Practice." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 995–1009.
23. Vogel, Christian, Guenter Heider, Stephan Haas, and Alfred Marzinek. "The new MAN 32/44 CR – efficient, clean and compact." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 36–46.
24. New HFO Common Rail System for Medium speed Diesel Engines. Web. 19 Feb. 2014 <<http://docslide.us/documents/man-common-rail-cimac1.html>>.
25. Shishkin, V. A., A. P. Petrov, and M. Yu. Ivanov. "Development of Two-Stroke Low-Speed Electronically-Controlled Diesel Engines." *Dvigatelsestroyeniye* 2 (2006): 26–31.
26. Heim, Klaus. "Latest developments of Wärtsilä low-speed engines to meet current and future customer demands." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 10–23.
27. Sugihara, Masahide, Koji Edo, and Takuma Tanida. "Creating a Whole Range of Benefits with the MITSUBISHI UEC Eco-Engine." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 1009–1019.
28. Hiraoka, Naohiro and Imanaka Katsumi. Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine. Web. 22 Aug. 2013 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
29. Kendlbacher, Christoph, D. Blatterer, M. Bernhaupt. "The 2200 bar Modular Common Rail Injection System for Large Diesel and HFO Engines." // http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf, p. 12.
30. Rehbachler, Gerhard, Christoph Kendlbacher, and Martin Bernhaupt. "The Bosch Electronic Diesel Control System for Medium and High Speed Engines." Web. 22 May 2014 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
31. Heller, Marc-Tran, Tobias Stelzer, Mike Riegert and Shusheng Li. L'Orange Fuel Injection Systems in China & Asia -Past Experience, Today's Expertise and Examples for Tomorrow's Excellence. Web. 22 Nov. 2015 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.

32. Result Type 51223 - Energy Control Technologies on the Queen Mary 2. Web. 20 July 2014 <<http://www.woodward.com/searchpublications.aspx>>.
33. Bataev, A. A., and V. A. Bataev. *Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie*. Novosibirsk: Publishing House of the Novosibirsk State Technical University, 2002.
34. Bataev, A. A., and V. A. Bataev. *Kompozicionnye materialy*. M.: Logos, Universitetskaja kniga. Serija Novaja universitetskaja biblioteka, 2006.
35. Mashinostroenie. Jenciklopedija. T. 3-6. Tehnologija proizvodstva izdelij iz kompozicionnyh materialov, plastmass, stekla i keramiki. M.: Mashinostroenie, 2006.
36. Dizelnye akkumuljatornye toplivnye sistemy COMMON RAIL (Bosch). M.: Izdatelstvo «Legion-Avtodata», 2010.
37. Oki, M., S. Matsumoto, Y. Toyoshima, and K. Ishisaka. *180MPa Piezo Common Rail System*. SAE Technical Paper. No. 2006-01-0274. DOI: 10.4271/2006-01-0274.
38. Oh, B, K. Lee, and M. Sunwoo. *Development of an Injector Driver for Piezo Actuated Common Rail Injectors*. SAE Technical Paper. No. 2007-01-3537. DOI: 10.4271/2007-01-3537.
39. Lazarev, V., J. Wloka, and G. Wachtmeister. *A Method for the Estimation of the Service Life of a Precision Guiding Interface "Needle - Nozzle Body" of a Common-Rail-Injector for High Rail Pressures*. SAE Technical Paper. No. 2011-01-2020. DOI:10.4271/2011-01-2020.
40. Minamino, Ryouta, Takao Kawabe, Hiroshi Omote, and Shusuke Okada. "Fuel injection concept for the future clean diesel engines." *Schiff&Hafen/Ship&Offshore* Sp. (2013): 8–9.
41. "The development of fuel systems of diesel engines (CIMAC Materials Congress 2013)." *Dvigatelsestroyeniye* 4 (2014): 46–57.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
spb-engine-prof@mail.ru
Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
app.polab@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivlyuk Gregory Evgenyevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
spb-engine-prof@mail.ru
Petrov Aleksandr Pavlovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
app.polab@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2015 г.

УДК 656.62.062.6/.8:54-133

Л. А. Хлюпин

ПРИЧАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАПРАВКИ СУДОВ КОМПРИМИРОВАННЫМ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ

Ресурс судового дизеля увеличивается при использовании в качестве моторного топлива природного газа. Практическое применение последнего затруднено отсутствием в настоящее время инфраструктуры для заправки судов природным газом. В статье представлены пять технических решений заправки судов сжатимированным природным газом (КПГ) давлением 5 и 20 МПа. Выбранные значения давления газа позволяют максимально использовать отечественное оборудование, серийно выпускаемое для заправки автотранспорта. Приведены основные характеристики автогазозаправщиков. Рассмотрены типы конструкции набережной для различных гидрогеологических условий площадки в пунктах строительства причалов. Выполнена оценка размеров причального фронта, стоечного судна и стационарного причала в зависимости от длины расчётного судна. Предложены оптимальные варианты причального сооружения в