

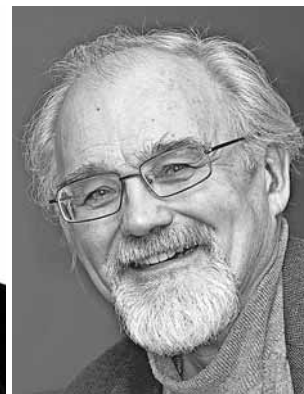
ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯТОРНЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ДИЗЕЛЕЙ БОЛЬШОЙ ЦИЛИНДРОВОЙ МОЩНОСТИ

Г.Г. Тер-Мкртчян, д.т.н., проф, М.В. Мазинг, к.т.н.
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

Аккумуляторные топливные системы типа common rail под воздействием жестких экологических требований постепенно вытесняют традиционную топливную аппаратуру на судовых и тепловозных дизелях с большой цилиндровой мощностью. Проведен анализ конструкций аккумуляторных топливных систем фирм «Bosch», «L'Orange» и «Dürr». Отмечены особенности этих систем: интегрирование топливных аккумуляторов в топливный насос и форсунку и использование на базе высокооборотного многоплунжерного насоса унифицированных платформ с изменяемыми размерами и числом насосных секций.

Топливная аппаратура судовых, тепловозных и промышленных дизелей большой цилиндровой мощности на протяжении большей части XX века принципиально практически не менялась. Требованиям к стоимости, надежности, долговечности вполне удовлетворяли системы с многоплунжерными и индивидуальными топливными насосами и насос-форсунки с кулачковым приводом плунжера. Такие системы просты конструктивно и в обслуживании, надежны, сравнительно легко компонуются на двигателе, допускают широкий диапазон изменения цикловых подач топлива. Основные же их недостатки — сильная зависимость давления впрыскивания и момента начала впрыскивания топлива от скоростного режима, а также трудности обеспечения равномерности подачи топлива по цилиндрам во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимов.

Ужесточение законодательства по ограничению выбросов вредных веществ с отработавшими газами и топливной экономичности дизелей и успехи в создании электромагнитных управляющих клапанов с высоким быстродействием привели к применению в этом классе дизелей топливной аппаратуры нового поколения с микропроцессорным управлением и высоким уровнем давлений впрыскивания. В первую очередь это коснулось топливных систем импульсного типа — индивидуальных ТНВД и насос-форсунок, которые благодаря переходу к клапанному способу дозирования получили дополнительную степень свободы в пределах профиля кулачка — гибкое



управление началом и продолжительностью впрыскивания топлива. Эти топливные системы обеспечивали высокие давления впрыскивания (180 МПа и выше) и позволили снизить вредные выбросы и расходы топлива. Однако из-за кулачкового привода насосных секций сохранился основной недостаток таких систем — зависимость характеристик от скоростного режима [1].

Дальнейшее ужесточение требований к выбросам вредных веществ стимулировало появление на рынке аккумуляторных топливных систем типа common rail (рис. 1). Наиболее важные преимущества этих систем заключаются в гибком управлении на каждом режиме работы величиной давления впрыскивания топлива, моментом начала, длительностью, фазами и формой характеристики впрыскивания, и, главное, в обеспечении управляемого многофазного процесса топливоподачи [2].

Аккумуляторные системы типа common rail для высокооборотных и среднеоборотных судовых, тепловозных и промышленных дизельных двигателей с большой цилиндровой мощностью по своему конструктивному исполнению отличаются от аналогичных топливных систем автотракторных дизелей, сохраняя при этом свою принципиальную схему и основной принцип работы — разделение во времени процессов создания энергии впрыскивания, дозирования и впрыскивания топлива.

Различие в конструктивном исполнении компонентов топливной системы вызвано в первую очередь необходимостью обеспечить увеличенные на один-два порядка расходы топлива этих двигателей при одновременном обеспечении требований безопасности для обслуживающего пер-

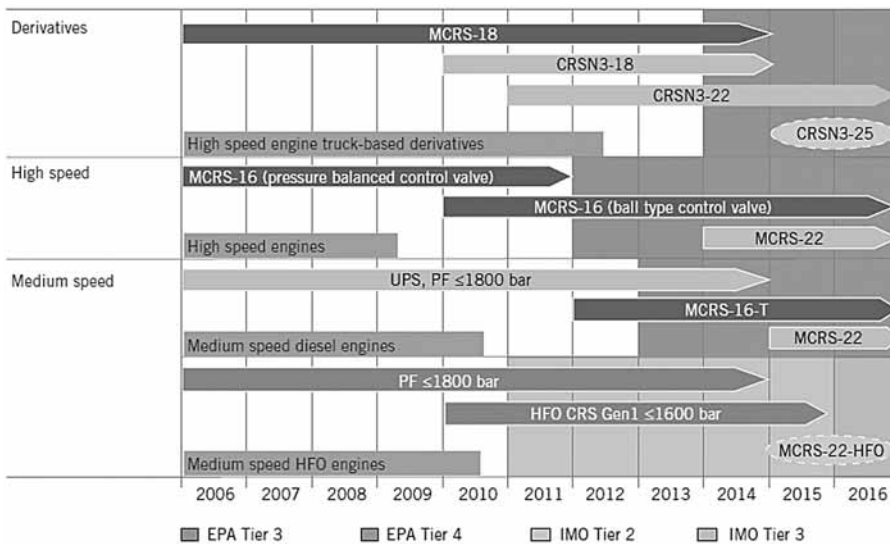


Рис. 1. Экологические стандарты для дизелей с большой цилиндровой мощностью и топливная аппаратура фирмы «Bosch»

сонала, поскольку увеличение количества топлива, находящегося под большим давлением в компонентах топливной системы, приводит к увеличению вероятности разрушения топливного аккумулятора и других агрегатов.

На дизелях с большой цилиндровой мощностью в основном используются аккумуляторные топливные системы типа common rail производства фирм «Bosch», «L'Orange» и «Duap».

Для высокооборотных дизелей судового назначения и для специальной техники с рабочим объемом цилиндра $V_h \leq 2,5$ л и цилиндровой мощностью до 120 кВт фирма «Bosch» поставляет адаптированную для судовых условий аккумуляторную систему третьего поколения CRSN3, разработанную для коммерческих автомобилей, с давлениями впрыскивания 180 и 220 МПа, с последующим повышением давления до 250 МПа. В состав системы CRSN3 входят насос высокого давления, электрогидравлическая форсунка, микропроцессорный блок управления, топливный аккумулятор с датчиком давления, ограничителем давления и управляющим клапаном PCVN (pressure control valve). Данная система имеет большой потенциал для оптимизации процесса сгорания (рис. 2) и способна формировать до семи впрыскиваний за цикл. Минимальная доза впрыскиваемого топлива $1,5 \text{ мм}^3$, максимальная — 450 мм^3 . Форсунка имеет такие же габаритные характеристики, как и у предыдущих поколений системы common rail, что позволяет легко модернизировать двигатели без изменения конструкции головки блока цилиндров [2].

В аккумуляторной системе CRSN3 используется топливный насос высокого давления CPN5-22/2 рядной модульной конструкции со встроенным шестеренным топливоподающим насосом. Макси-

мальная производительность насоса 250 л/ч. Масса насоса снижена на 30 % по сравнению с насосом предыдущего поколения. Детали насоса смазываются топливом.

Для высокооборотных судовых дизелей с цилиндровой мощностью более 120 кВт фирмой «Bosch» разработана модульная аккумуляторная система MCRS-18 (Modular Common Rail System) с давлением впрыскивания 180 МПа, конструкция которой отличается от стандартной системы common rail отсутствием топливного аккумулятора как отдельного компонента.

Вместо единого топливного аккумулятора в системе MCRS предусмотрены отдельные аккумуляторы, интегрированные в форсунки и ТНВД (рис. 3). Благодаря такому конструктивному решению система MCRS может применяться на двигателях с увеличенным по сравнению с классической системой common rail числом цилиндров — до 10 при рядном их расположении и до 16 — при V-образном. Кроме того, такая конструкция позволяет демпфировать колебания, генерируемые ТНВД в процессе закрытия нагнетательного клапана и форсункой при окончании впрыскивания топлива.

На высокооборотных судовых дизелях с V_h от 2,5 до 7 л и цилиндровой мощностью до 250 кВт используются два варианта системы MCRS-16 с давлением впрыскивания 160 МПа, отличающихся конструкцией управляющего клапана форсунки.

Для среднеоборотных судовых и тепловозных дизелей с $V_h \approx 4\text{--}32$ л и цилиндровой мощностью до 500 кВт фирма «Bosch» в 2012 г. поставила на

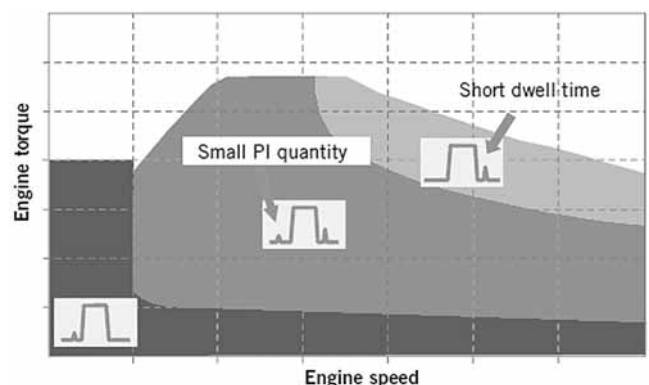


Рис. 2. Характеристики впрыскивания топлива системы CRIN3

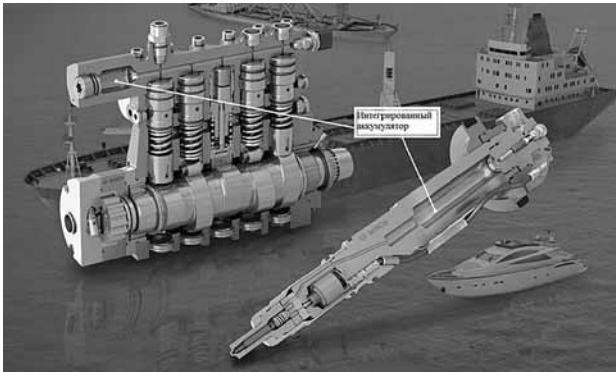


Рис. 3. Топливный насос и форсунка системы MCRS «Bosch» со встроенными аккумуляторами

производство аккумуляторную систему MCRS-T, разработанную на базе системы MCRS и рассчитанную на большие цикловые подачи. Система MCRS-T используется в двигателях, соответствующих экологическим нормам Tier 4 и отличается наличием индивидуального топливного насоса CP9.2 с электромагнитным дозатором. Смазывают маслом. Насос смазывается маслом и рассчитан на работу с давлением до 220 МПа. Топливный аккумулятор встроен в корпус форсунки CRIN-LE (см. рис. 3), управляющий шариковый клапан которой полностью гидравлически уравновешен, что позволило уменьшить затраты энергии на его привод. Вращением шарика предотвращается накопление частиц на посадочном диаметре и обеспечивается требуемая гидроплотность клапана. Распылитель форсунки благодаря оптимизированной конструкции в меньшей степени подвержен кавитационному износу. Форсунки одного комплекта связаны друг с другом с помощью коротких топливопроводов высокого давления (в том числе имеющих двойные стенки).

Особой проблемой для систем common rail судовых двигателей является качество топлива и нестабильность его характеристик, негативно влияющих на работу управляющих клапанов.

Для среднеоборотных судовых дизелей с $V_h \approx 33-290$ л и цилиндровой мощностью до 2100 кВт, работающих на тяжелом топливе с повышенной вязкостью, фирма «Bosch» совместно с фирмой «MAN Diesel & Turbo» разработали систему MCRS-22-HFO (рис. 4), позволяющую обеспечить выполнение экологических требований IMO Tier 2 [3].

Индивидуальные ТНВД, используемые в системе, оснащены дозирующим модулем. Циркуляционный клапан служит для осуществления предварительного прогрева тяжелого топлива. Управление процессом топливоподачи осуществляется блоком клапанов, расположенных на каждом торце «аккумуляторного блока», которые

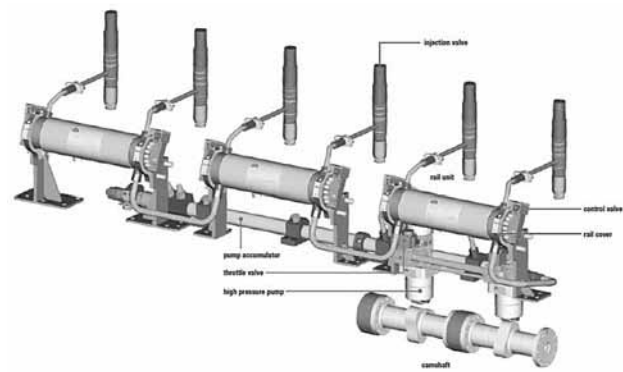


Рис. 4. Аккумуляторная система MCRS-22-HFO для работы на тяжелом топливе

оснащены жиклерами, предотвращающими непредвиденное увеличение цикловой подачи.

Для судовых дизелей, соответствующих экологическим нормам IMO Tier 3, введение которых предполагается в 2016 г., фирмы «Bosch» и «MAN Diesel & Turbo» разработали систему MCRS-22-HFO второго поколения, сочетающую преимущества системы первого поколения и системы MCRS-22. Форсунка CRIN-LE-22-HFO со встроенным аккумулятором, обеспечивает повышение давления до 220 МПа и способна формировать трехфазную цикловую подачу топлива. Проведенные испытания на одноцилиндровых отсеках подтвердили соответствие выбросов вредных веществ экологическим нормам IMO Tier 3.

Фирма «L'Orange» (Германия) является крупнейшим производителем топливоподающей аппаратуры для дизелей с большой цилиндровой мощностью, в том числе и для работы на тяжелых топливах с повышенной вязкостью — мазутах. Фирмой «L'Orange» разработана аккумуляторная система типа common rail, которой с 2002 г. комплектуются многоцилиндровые (до 20 цилиндров) V-образные дизели MTU серии 4000 [4].

Электрогидравлическая форсунка «L'Orange» для дизеля MTU по своим техническим решениям аналогична форсункам фирмы «Bosch». Наряду с электромагнитным приводом управляющего клапана и мультипликатором она содержит дополнительный управляющий золотник с промежуточным клапаном, увеличивающим быстроту действия форсунки.

Управление производительностью восьмисекционного ТНВД осуществляется дросселированием на всасывании. В конструкцию ТНВД заложено несколько удачных технических решений. Для сглаживания пульсаций давления насос снабжен встроенным топливным аккумулятором. Привод плунжеров эксцентриковый, более работоспособный по контактным давлениям по сравнению с кулачковым приводом. Для увеличения

несущей способности подшипников в эксцентрик-овый вал подводится смазка.

Основным направлением работ фирмы «L'Orange» для среднеоборотных дизелей остается разработка и производство аккумуляторных систем для работы на тяжелых топливах с повышенной вязкостью. Эти системы начали разрабатывать с 2000 г., наращивая давление впрыскивания от 120 до 180 МПа для дизелей с цилиндровой мощностью порядка 100 кВт. Для получения давления используются индивидуальные насосы с электроуправляемыми клапанами расхода и слива топлива, отличающиеся от применяемых в системах непосредственного действия только использованием кулачков или эксцентриков с профилем меньшей крутизны. С 2003 г. индивидуальные ТНВД используются в аккумуляторной системе среднеоборотных дизелей W32CR фирмы «Wartsila» с цилиндровой мощностью до 460 кВт.

С 2004 г. фирмой «L'Orange» начата разработка унифицированных топливных насосов (рис. 5) для аккумуляторных систем судовых дизелей агрегатной мощностью от 1000 до 20 000 кВт, работающих на мазутах. Номинальная частота вращения кулачкового вала насоса значительно превышает частоту коленчатого вала и равна 3150 об/мин. Направление вращения кулачкового вала для всех вариантов насоса — левое, регулирование производительности осуществляется дросселированием на впуске. Дроссельный регулятор производительности с управляющим его положением соленоидом, выполненным в виде пропорционального электромагнита, отделен от агрессивного влияния тяжелого топлива.

Система смазки дизеля обеспечивает и смазку ТНВД, защищая его от воздействия воды, частиц и химически активных веществ, находящихся в тяжелом топливе. Утечки топлива удаляются, не попадая в картер ТНВД. Интегрированный в го-

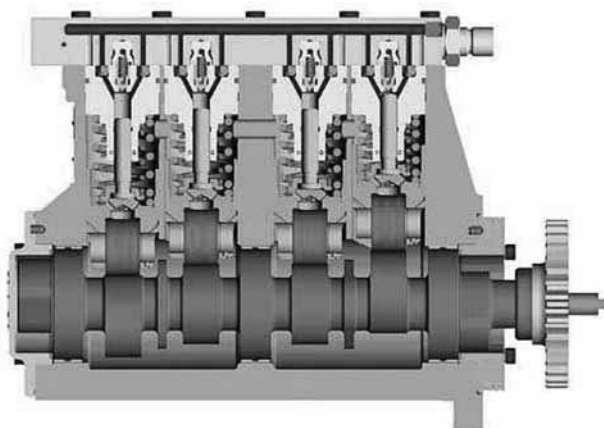


Рис. 5. Унифицированный топливный насос фирмы «L'Orange» для судовых дизелей

ловку ТНВД топливный аккумулятор цилиндрической формы имеет выход на два топливо-отводящих штуцера, что удобно для работы в составе V-образного дизеля [5].

Удачным нетрадиционным решением является закрепление втулки насосной секции, которая прижимается к головке насоса пружиной, а не жесткими отбортовками корпуса. При этом автоматически решается проблема устранения перекоса и нарушения уплотнения по верхнему торцу нескольких втулок единой головки.

Насосная секция (рис. 6) отличается расположением клапанов внутри втулки, что существенно упрощает головку и сопряжение с ней. Утечки топлива возвращаются во впускную полость, при этом исключается смешение тяжелого топлива с маслом. Состояние стыка сопряжения с головкой насоса оптимизировалось на конечно-элементных моделях, с помощью которых выбрана минимально необходимая поверхность контакта. Кроме деформации анализировались и напряжения во втулке.

Унифицированные ТНВД на базе универсальной платформы применялись весьма широко: на дизеле «Liebherr» карьерного самосвала, на дизеле MTU локомотива «Геркулес», на дизелях морских буксиров и т. д. ТНВД были успешно применены на дизеле «Wartsila» модели W32, на которых до 2001 г. использовали систему common rail первого поколения.

Разработанная в 2010 г. аккумуляторная топливная система позволяет обеспечить требования экологических норм IMO Tier 2 и содержит ранее отработанные фирмой «L'Orange» компоненты: индикатор утечек, предохранительный клапан (PDSV — Pressure Drop Safety Valve), перепускной клапан для выпуска воздуха. Из соображений

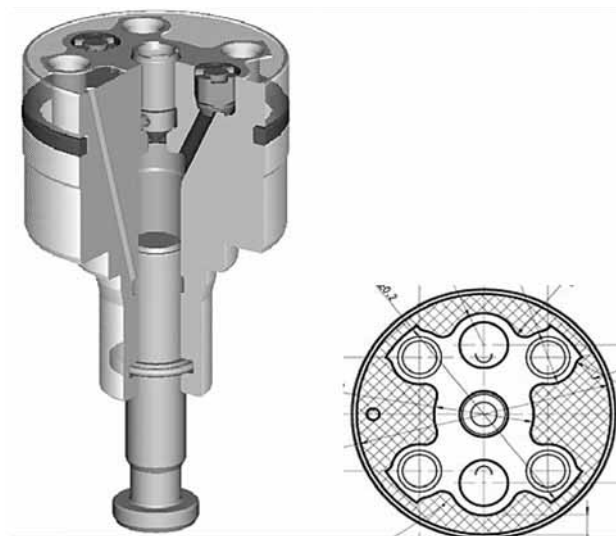


Рис. 6. Насосная секция унифицированного ТНВД фирмы «L'Orange»

безопасности все топливопроводы имеют двойную стенку.

Для судовых дизелей с диаметром поршня более 200 мм, работающих на тяжелых топливах с вязкостью порядка 13–17 сСт, швейцарская фирма DUAP разрабатывает и производит аккумуляторные системы DUARAIL, для комплектации которых серийно используются два семейства насосов высокого давления CRP-12DF и CRP-18HF производительностью соответственно 3,5–8,7 и 8,9–35,7 л/мин [6].

Аккумуляторные топливные системы common rail, получающие в последнее десятилетие применение в дизелях с большой цилиндровой мощностью, в настоящее время активно вытесняют другие типы топливной аппаратуры. Управление характеристикой впрыскивания предусматривает возможность организации двухфазного или многофазного впрыска, что ранее было нехарактерно для этого класса дизелей.

Среди множества разработанных и производимых топливных насосов для систем common rail применительно к дизелям с большой цилиндровой мощностью следует выделить технические решения фирм «Bosch» и «L'Orange», использующие унифицированную платформу с изменяемыми размерами и числом насосных секций на базе высокооборотного многоплунжерного топливного насоса. Применение унифицированной платформы обеспечивает снижение стоимости и времени разработки топливной системы в условиях мелкосерийного производства и разнообразия моделей крупных дизелей, а также позволяет относительно просто адаптировать

компоненты топливной системы к различным их модификациям.

Эффективным решением для многоцилиндровых крупных дизелей, позволяющим повысить надежность работы аккумулятора и минимизировать негативное влияние волновых процессов на параметры впрыскивания, является разделение аккумулятора на несколько блоков, зачастую интегрированных в топливный насос и форсунку.

Литература

1. *Тер-Мкртчян Г.Г.* Обеспечение малотоксичного рабочего процесса форсированных перспективных дизельных двигателей / Г.Г. Тер-Мкртчян, М.В. Мазинг, А.Г. Ветошников // *Современные проблемы науки и образования.* — 2013. — № 5; URL: www.science-education.ru/111-10237.
2. *Lonard R.* Injection Technology for Marine Diesel Engines / R. Lonard, M. Parche, C.K. Bacher // *MTZ 0412011 Volume 72.* — P. 10–16.
3. *Тер-Мкртчян Г.Г.* Тенденции развития аккумуляторных топливных систем крупных дизелей / Г.Г. Тер-Мкртчян, Е.Е. Старков // *Труды НАМИ: сб. науч. ст.* — М., 2013. — Вып. № 255. — С. 22–47.
4. *Kendlbacher C.* Large Engine Injection Systems for Future Emission Legislations / C. Kendlbacher, P. Mueller, M. Bernhaupt. // Paper №. 50, CIMAC Congress 2010, Bergen, 11 p.
5. *Wintruff I.* The next generation of MTU series 4000 rail engines to comply with EUIIIВ emission legislation / I. Wintruff, O. Buecheler, S. Huchler // Paper № 211, CIMAC Congress 2010, Bergen, 7 p.
6. *Vogt E.* Economical and technical aspects of DU-AP's fuel Injection parts and systems / E. Vogt, S.R. Jung, M. Poletti // Paper № 131, CIMAC Congress 2010, Bergen, 8 p.