

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

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

Выполнен анализ влияния норм выбросов вредных веществ с отработавшими газами на развитие топливной аппаратуры автодизелей. Показано, что аккумуляторные системы типа common rail становятся основным типом топливной аппаратуры для автомобильного транспорта и автодизельной техники. Отмечено, что эти системы находятся в стадии развития и их оптимальная конструкция и принцип работы основных компонентов еще окончательно не сформировались. Показаны перспективы развития комбинированных аккумуляторных систем с мультипликаторами давления, сочетающие достоинства систем common rail и гидроприводных насос-форсунок.

Основной проблемой для транспортных двигателей различного назначения является необходимость обеспечить соответствие перспективным экологическим стандартам, особенно по выбросам с отработавшими газами  $\text{NO}_x$  и дисперсных (твердых) частиц при одновременном улучшении топливной экономичности. За последние 20 лет предельно допустимые выбросы вредных веществ ужесточились примерно в 10 раз. Так, для дизельных автотранспортных средств массой более 3,5 т, Правилами ЕЭК ООН № 49 предусмотрено снижение к 2016–2018 г. предельно допустимых выбросов  $\text{NO}_x$  почти в 9 раз (с 3,5 до 0,4 г/кВт·ч) и твердых частиц с 0,03 до 0,01 г/кВт·ч, т. е. в три раза (рис. 1).

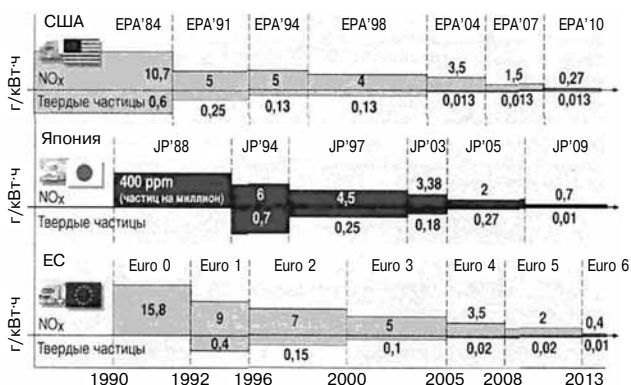


Рис. 1. Изменение предельно допустимых выбросов  $\text{NO}_x$  и частиц в различных странах мира

В соответствии с требованиями специального Технического регламента к выбросам автомобильной техникой вредных веществ, с 1.01.2013 года в России действуют экологические нормы Евро-4, с 1.01.2015 года вводятся еще более жесткие нормы Евро-5 и в перспективе — Евро-6.

Жесткое нормирование выбросов вредных веществ с отработавшими газами и уровня шума требует постоянной модернизации конструкции двигателя, в первую очередь, его топливной системы и топливной аппаратуры. Прежде всего, это проявилось в необходимости обеспечить надежность и стабильность работы топливной аппаратуры при резком возрастании максимального давления впрыскивания топлива, которое с 1980 года выросло в 4 раза и, достигнув в настоящее время 200–250 МПа, имеет тенденцию к дальнейшему увеличению [1].

На автодизельных двигателях крупносерийного и массового производства использовалась в основном и продолжает использоваться топливная аппаратура разделенного типа, включающая ТНВД, топливопроводы высокого давления и форсунки, при этом на дизелях грузовых автомобилей применяются рядные многоплунжерные и индивидуальные ТНВД, а на малолитражных быстроходных дизелях легковых автомобилей — насосы распределительного типа. Незначительная часть автодизельных двигателей комплектуется насос-форсунками, в основном с механическим приводом плунжера.

К важному этапу развития дизельной топливной аппаратуры можно отнести переход от механических регуляторов частоты вращения к микропроцессорным системам управления. Основу системы управления топливной аппаратурой нового поколения составляет программное обеспечение и, соответственно, алгоритмы управления, которые обрабатываются для каждого конкретного типа двигателя. Такой тип топливной аппаратуры на сегодняшний день является преобладающим для современных транспортных дизельных двигателей и ее выпуск постоянно возрастает.

Для достижения комплексного снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами, при сохранении или даже улучшении достигнутых показателей топливной экономич-

ности, необходимо обеспечить качественно новые функции топливной аппаратуры, отсутствующие или недостаточно эффективно реализованные в аппаратуре традиционного типа с механическими и электронными системами регулирования. Решение этой проблемы требует качественной организации процесса сгорания топлива в каждом цилиндре дизеля, и в каждом рабочем цикле на всех режимах его работы, в том числе и на неустановившихся.

Функции дизельной топливоподающей аппаратуры традиционного типа заключаются, главным образом, в определении того, *сколько* топлива подать за цикл и *когда*, в то время как для перспективных систем, предназначенных для снижения вредных выбросов в соответствии с требованиями перспективных стандартов, все более актуальной становится задача определения того, *каким образом* подать топливо в цилиндр дизеля. Так, например, управление кинетикой горения и образования вредных веществ формирует требование к форме характеристики впрыскивания топлива, в том числе к необходимости разделения процесса впрыскивания на несколько фаз, т. е. обеспечение многофазного процесса впрыска.

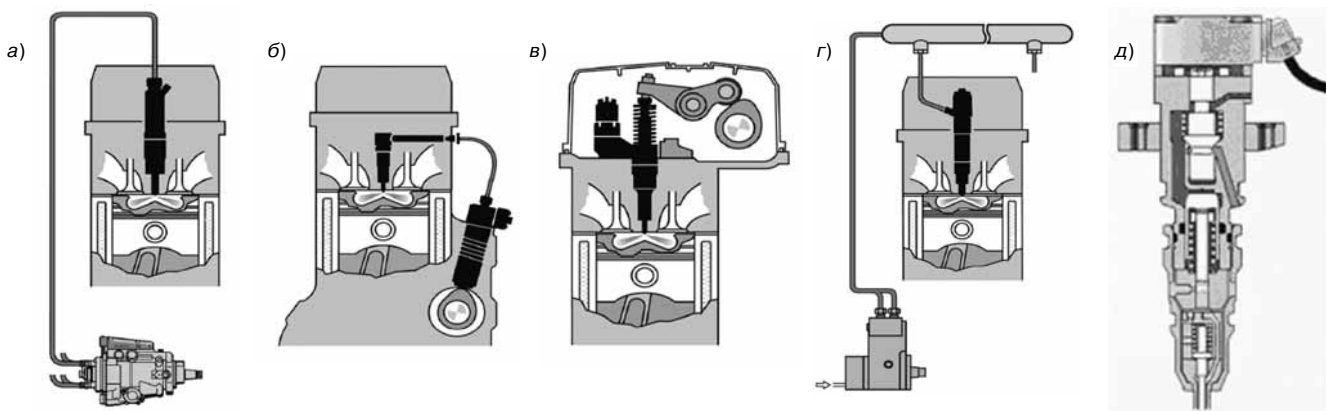
Расширенное применение в автотракторных дизелях топливной аппаратуры нового поколения с микропроцессорным управлением и высоким уровнем давлений впрыскивания, наблюдающееся с начала 90-х годов, следует отнести к революционным изменениям в технологии современного дизелестроения.

К аппаратуре нового поколения относятся как системы импульсного впрыскивания с механическим приводом насосных секций (насос-форсунки и индивидуальные топливные насосы), так и аккумуляторные топливные системы, то есть системы непрямого действия с гидроприводными насос-форсунками типа HEUI и системы прямого

действия типа common rail (рис. 2). В аппаратуре такого типа золотниковый способ дозирования топлива и механическая система регулирования заменены дозированием электромагнитными клапанами, управляемыми микропроцессорным блоком. Благодаря переходу к клапанному способу дозирования резко расширяются возможности по управлению процессом топливоподачи, а именно величиной подачи, продолжительностью, фазами впрыскивания топлива и количеством впрыскиваемых доз топлива. Аппаратура же традиционного типа практически повсеместно снимается с производства и становится историей.

Наиболее перспективными с точки зрения выполнения требований по выбросам вредных веществ, уровню шума и топливной экономичности являются аккумуляторные системы топливоподачи обоих типов, которые активно вытесняют аппаратуру импульсного впрыскивания. Главным достоинством этих систем является разделение во времени процессов создания энергии впрыскивания, дозирования и впрыскивания топлива, вследствие чего эти процессы не оказывают неблагоприятного воздействия друг на друга. Сочетание аккумуляторной системы с электрогидроприводными форсунками (или электрогидроприводными насос-форсунками) и электромагнитными клапанами позволяет регулировать давление впрыскивания на любом режиме работы двигателя и управлять самой характеристикой впрыскивания топлива, числом и фазами отдельных доз топлива за рабочий цикл, обеспечивая управляемый многофазный характер процесса впрыскивания топлива, что значительно расширяет возможности управления рабочим процессом двигателя.

Наиболее распространенным типом аккумуляторной системы топливоподачи с электрогидроприводными насос-форсунками является разработанная в начале 90-х годов и серийно выпу-



**Рис. 2. Топливная аппаратура современных автотракторных дизелей:**

*а* — традиционного типа; *б* — индивидуальный ТНВД с электромагнитным клапаном (ЭМК); *в* — насос-форсунка с механическим приводом и ЭМК; *г* — система типа common rail; *д* — система типа HEUI

скаемая фирмой «Caterpillar» для своих дизельных двигателей топливная система HEUI (Hydraulic Electronic Unit Injection), первые образцы которой обеспечивали давление впрыскивания 135 МПа, но уже в 1995 году эта величина была повышена до 150 МПа. Принципиальное достоинство этих систем состоит в наличии в контурах управления существенно меньшего давления (15–25 МПа), чем давление впрыскивания. Соотношение этих давлений примерно равно отношению площадей сервопоршня и нагнетающего плунжера [2].

В России работы по созданию электрогидроприводной насос-форсунки выполнялись в ЦНИТА. МАДИ, ЯЗТА [3]. Алтайским заводом прецизионных изделий разработана и подготовлена к производству аккумуляторная система ACRS-2 с гидроприводными насос-форсунками, в корпусах которых встроены мультипликаторы давления. Система обеспечивает давление впрыскивания 150–200 МПа и предназначена для дизелей с рабочим объемом одного цилиндра 1–2 л (ММЗ, КамАЗ, Автодизель, ПО АМЗ, ВМТЗ) и величиной цикловых подач топлива до 250 мм<sup>3</sup>. В качестве рабочего тела для создания среднего давления в системе ACRS-2 используется топливо, т. е. в отличие от системы HEUI фирмы «Caterpillar», использующей в линии среднего давления масло, система ACRS работает по схеме топливо-топливо. Нагнетание топлива производится двухсекционным насосом с регулированием производительности и величины давления на линии всасывания [4].

Начало серийного производства аккумуляторных систем прямого действия типа common rail относится к 1997 г., когда фирма «Bosch» совместно с фирмой «Fiat» выпустили систему UNIJET для дизелей 1,9JTD и 2,4JTD, устанавливаемых на легковых автомобилях «Alfa Romeo». Система UNIJET обеспечивала максимальную подачу топлива до 100 мм<sup>3</sup> в диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя от 100 до 6000 об/мин при максимальном давлении впрыскивания 135 МПа и предварительном впрыскивании дозы топлива 0,5–1,5 мм<sup>3</sup> [5]. В 1999 г. на основе UNIJET была поставлена на производство система CRSN1 для легких грузовиков «Iveco» («Turbo Daily»). Немногом позже появилась версия с давлением впрыскивания 140 МПа для крупных транспортных средств. В 2001 г. модернизированная система с давлением 160 МПа была представлена в США на автомобилях типа «пикап».

Взрывной характер объемов производства аккумуляторных топливных систем, наблюдающийся с 90-х годов XX века, обусловлен достигнутыми к этому времени успехами в создании электромагнитных управляющих клапанов с вы-

соким быстродействием и микропроцессорного управления. Разработкой аккумуляторных систем занимаются все ведущие мировые фирмы в данном секторе рынка и совершенствование этих систем является наиболее динамично развивающимся направлением в двигателестроении.

Аккумуляторные системы серийно выпускаются немецкими фирмами «Robert Bosch» и «Continental Trading GmbH», которой фирма «Siemens» передала производство систем CRS (Common Rail Siemens), японскими фирмами ZEXEL и «Nippon Denso», фирмой «Delphi Diesel Systems», входящей в международный концерн «Delphi», швейцарскими фирмами DUAP и «Liebherr». Системы common rail» фирмы «Bosch» устанавливаются на дизельные двигатели нового поколения практически всех фирм и производителей (в основном европейских и азиатских фирм). Фирма «Delphi» является поставщиком систем DCR (Delphi Common Rail) для дизелей, выпускаемых фирмами «Renault/Nissan», PSA, «Hyundai/Kia», «Ford» и др. В России система типа common rail производства ОАО «ЯЗДА» и ЗАО «АЗПИ» устанавливается на автомобильных дизелях ЯМЗ-656 [6].

На сегодняшний день принципиальная схема системы common rail в основном сформирована. Система включает топливный насос высокого давления с регулируемой производительностью и давлением, топливный аккумулятор, комплект форсунок с быстродействующими электроприводными клапанами и микропроцессорную систему управления. Компоновка основных элементов (насоса, топливного аккумулятора, топливопроводов) на двигателе значительно упрощена по сравнению с традиционными системами топливоподачи. Основные элементы аккумуляторной системы (блок управления, датчики, насос высокого давления, электромагнитные клапаны, регулятор давления, алгоритм управления), предназначенной для двигателей разного класса и назначения, обладают высокой степенью унификации.

При практически одинаковых принципах управления процессом топливоподачи и, как следствие, близкими параметрами топливоподачи, топливные системы common rail производства разных фирм различаются по конструктивному исполнению основных элементов и принципам их работы. Эти различия свидетельствуют о том, что топливные системы common rail находятся в стадии развития и их оптимальная конструкция и принцип работы основных компонентов (прежде всего форсунок и насосов высокого давления) еще окончательно не сформировались. Кроме того, при постоянном совершенствовании конструкции топливных систем

одного разработчика иногда существенно меняется и принцип их работы.

Основное различие между электрогидравлическими форсунками, выпускаемыми разными производителями, заключается в конструкции и принципе работы управляющих клапанов (однозатворный или двухзатворный, шариковый или с коническим затвором, разгруженный от давления топлива или неразгруженный), характере обратной связи (отрицательная или положительная) в способе управления приводом клапана — электромагнитный или пьезоэлектрический. Указанные отличия оказывают определяющее влияние на основные характеристики системы в целом.

В качестве ТНВД в аккумуляторных системах типа common rail применяются рядные многоплунжерные топливные насосы, звездообразные радиально-плунжерные и роторные. Все варианты топливных насосов при нагнетании топлива обеспечивают сглаженный характер нагружения приводного вала крутящим моментом, а сама величина крутящего момента в несколько раз меньше, чем для привода распределительного насоса с таким же уровнем давлений. Благодаря этому требования к приводу топливного насоса снижены до уровня требований к прочим вспомогательным агрегатам двигателя, несмотря на высокие давления нагнетания. Регулирование производительности насосов всех типов и создаваемого ими давления производится с помощью электроуправляемых дозаторов на входе в насос, использующих принцип дросселирования на впуске.

В зависимости от числа цилиндров и рабочего объема цилиндров двигателя, номинальной частоты вращения и необходимой величины цикловой подачи топлива, привод насоса от коленчатого вала выполняется с передаточным отношением 1:2, 1:1,5 или 1:1.

К наиболее нагруженным компонентам топливной системы common rail относятся топливные насосы высокого давления, топливные аккумуляторы и форсунки, которые находятся под постоянным воздействием высоких давлений. Обеспечение работоспособности этих компонентов при повышении уровня давлений достигается как за счет использования новых материалов с высокими прочностными свойствами, так и путем совершенствования конструкции.

Совершенствование аккумуляторных систем common rail ведется главным образом в направлении повышения максимальных давлений впрыскивания до 200–250 МПа и выше для систем, подготовленных к постановке на производство во втором десятилетии XXI века.

На рис. 3 представлены основные этапы развития аккумуляторных систем высокого давле-

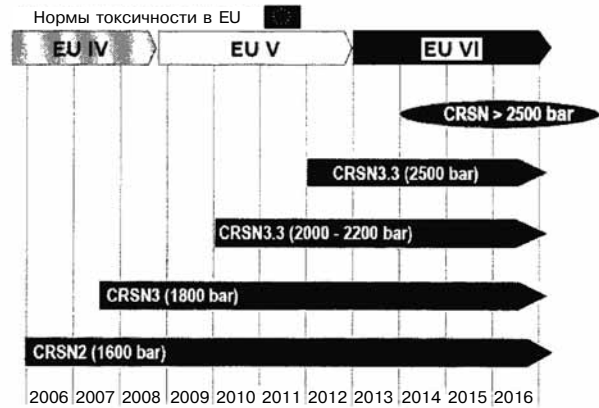


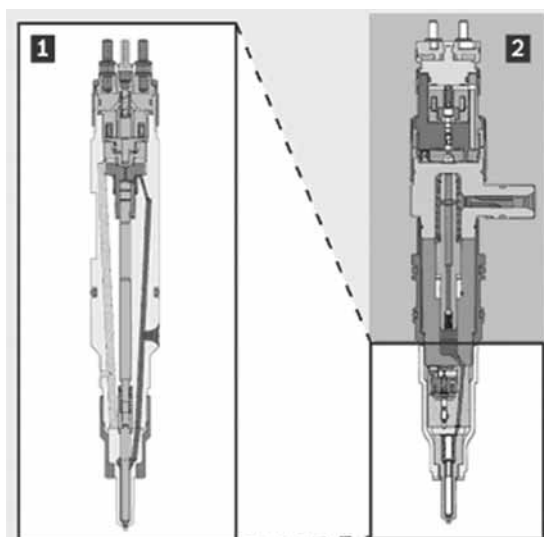
Рис. 3. Развитие аккумуляторных систем «Common Rail» фирмы «Bosch»

ния common rail, выпускаемых фирмой «Bosch» [7]. Из приведенных данных следует, что постоянное ужесточение норм выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей сопровождается ростом требований к рабочим параметрам топливной аппаратуры, что находит свое отражение в ее модернизации.

В аккумуляторной системе CRSN3 с давлением 180 МПа форсунка имеет пониженный расход топлива на управление, что позволило снизить производительность насоса высокого давления и повысить эффективность системы и двигателя в целом. Конструкция системы постоянно развивалась, с обеспечением давления впрыскивания топлива соответственно 200 и 220 МПа. С 2013 г. началось производство системы CRSN3-25 с давлением впрыскивания 250 МПа. Система CRSN3-25 предназначена для применения в двигателях средних и тяжелых грузовых автомобилей с количеством цилиндров от 4 до 16, а также в силовых агрегатах для спецтехники (тракторы, строительное оборудование) и для двигателей судового назначения (яхты, круизные лайнеры, контейнеровозы).

Дальнейшее ужесточение законодательных норм выбросов вредных веществ с отработавшими газами послужило основной предпосылкой для разработки фирмой «Bosch» системы CRSN 4 четвертого поколения для тяжелых коммерческих автомобилей. При этом рост давлений впрыскивания поставил разработчиков перед необходимостью решения проблемы обеспечения повышенной механической и термической нагруженности компонентов топливной системы, особенно топливного насоса и топливного аккумулятора, от надежности которых зависит стабильность работы системы и ее долговечность.

При решении этой проблемы использован принцип действия аккумуляторной системы непосредственного действия типа HEUI с разделением



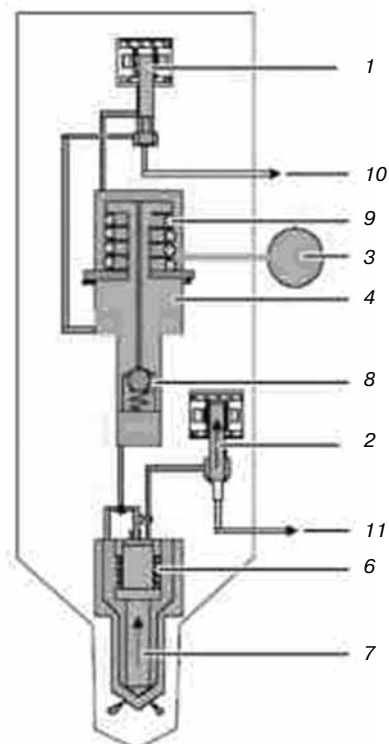
**Рис. 4. Электрогидравлические форсунки:**  
1 — CRIN3; 2 — CRIN4

процесса повышения давления на две стадии. В системе «Amplified Common Rail System» (ACRS) — аккумуляторной системе четвертого поколения — топливный насос создает давление в диапазоне (21–110 МПа), которое затем повышается до 210–250 МПа в форсунке CRIN4-25, конструкция которой претерпела существенное изменение [7].

Форсунка с усилителем давления CRIN4 (рис. 4) разработана на основе классической форсунки CRIN3 при сохранении ее габаритных размеров, но отличается от нее по принципу действия и дизайну. Были сведены к минимуму размеры деталей управления процессом впрыскивания за счет новой компактной конструкции управляющего клапана, чтобы освободить место для усилителя давления. В конструкцию форсунки заложен модульный принцип, вследствие чего составляющие ее элементы разделены на три модуля — впрыска, управления и усилителя давления [9].

Модуль впрыска включает управляющий электромагнитный клапан 2 (рис. 5) и распылитель 6. Однозатворный управляющий клапан заменен гидравлически уравновешенным двухзатворным управляющим клапаном 2, размещенным в нижней части корпуса форсунки и гидравлически связанным с иглой 7 распылителя 6. Перепуск топлива, затраченного на управление процессом впрыскивания, производится по каналу 11.

Модуль усиления давления (усилитель давления) с поршнем-мультипликатором 4, обратным клапаном 8 и возвратной пружиной 9 размещен в освободившейся верхней части корпуса форсунки и используется для генерации высокого давления внутри форсунки за счет разницы площадей



**Рис. 5. Принципиальная схема форсунки CRIN4:**  
1 — управляющий клапан усилителя давления; 2 — управляющий клапан форсунки; 3 — топливоподводящий канал; 4 — поршень-мультипликатор; 6 — распылитель; 7 — игла распылителя; 8 — обратный клапан; 9 — пружина; 10, 11 — перепускные каналы

поршня-мультипликатора 4. Топливо из топливного аккумулятора под давлением, создаваемым насосом высокого давления, подводится по каналу 3 непосредственно к поршню-мультипликатору 4. Перепуск топлива из клапана 1 усилителя давления производится по каналу 10.

Модуль управления, размещенный в верхней части корпуса форсунки, снабжен дополнительным электромагнитным клапаном 1, с помощью которого активируется усилитель давления в зависимости от режима работы двигателя и независимо от активации управляющего клапана форсунки 2. Модуль управления позволяет выбрать максимально эффективный способ повышения давления за счет изменения фазового сдвига между моментами активации двух управляющих клапанов форсунки, обеспечивая таким образом получение требуемой формы характеристики впрыскивания основной порции топлива. При активации управляемого сливного клапана 1 до начала активации электромагнитного клапана 2, характеристика впрыскивания основной порции топлива получается близкой к трапециевидной. При одновременной активации клапанов 1 и 2 впрыскивание основной порции топлива производится с постепенным повышением давления. При активации блоком управления управляющего клапана 2 до

активации управляемого сливного клапана 1, форма характеристики впрыскивания основной порции топлива получается близкой к ступенчатой.

Степень повышения давления является отдельной опцией форсунки CRSN4, которая может функционировать как в режиме «повышения давления», так и без повышения. Впрыскивание малых доз топлива до и после основной подачи (до 7 отдельных впрысков) производится без усиления давления.

Пониженное давление в аккумуляторе, меньший расход топлива на управление форсунками по сравнению с предшествующими классическими системами стали основными факторами для разработки нового семейства модульных ТНВД CPN5. Новое семейство ТНВД рассчитано на меньшую производительность и на существенно меньшее повышение давления по сравнению с ТНВД в системе CRSN3. Это позволяет отказаться от смазки ТНВД маслом двигателя и организовать смазку трущихся частей топливом, что дает возможность спроектировать насосные элементы с оптимальными зазорами, поскольку утечки из плунжерных пар, попадающие в корпус ТНВД, не будут контактировать со смазочной системой двигателя. Также меньшее давление нагнетания снижает деформации корпуса ТНВД.

Фирма «Detroit Diesel», являющаяся частью концерна «Daimler AG», с 2012 г. применяет аккумуляторные топливные системы в сочетании с мультипликаторами давления в новом семействе шестицилиндровых дизелей DD 13, DD 15 и DD 16. В системе ACRS (Amplified Common Rail System) двухсекционный топливный насос создает первоначальное давление до 90 МПа, которое затем повышается в электрогидравлической форсунке до 210 МПа и его величина контролируется двумя электромагнитными управляющими клапанами [10].

Проведенный анализ состояния и перспектив развития топливной аппаратуры автотракторных дизелей показал, что в последние годы аккумуляторные системы типа common rail, обладающие наибольшими возможностями управления процессом топливоподачи, становятся основным типом топливной аппаратуры как легковых, так и грузовых автомобилей и автотракторной техники.

Эти системы обеспечивают получение оптимальных параметров топливоподачи для всего диа-

пазона рабочих режимов и обладают высокой степенью унификации для двигателей разной размерности цилиндров. Главным достоинством аккумуляторных систем common rail является разделение во времени процессов создания энергии впрыскивания, дозирования и впрыскивания топлива, вследствие чего эти процессы не оказывают неблагоприятного воздействия друг на друга. Это дает возможность регулировать давление впрыскивания на любом режиме работы дизеля и управлять законом впрыскивания топлива в функции времени, количеством и фазами отдельных доз топлива при многофазном впрыске.

К перспективным направлениям развития топливных систем common rail можно отнести создание комбинированных аккумуляторных системы с мультипликаторами давления, сочетающие достоинства классических систем common rail и гидроприводных насос-форсунок.

#### Литература

1. Тер-Мкртчян Г.Г., Мазинг М.В., Ветошиников А.Г. Обеспечение малотоксичного рабочего процесса форсированных перспективных дизельных двигателей // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 5; URL: [www.science-education.ru/111-10237](http://www.science-education.ru/111-10237).
2. Тер-Мкртчян Г.Г. Комбинированные аккумуляторные системы с мультипликаторами давления — новый этап развития топливной аппаратуры дизелей грузовых автомобилей / Г.Г. Тер-Мкртчян, А.А. Демидов, Е.Е. Старков // Труды НАМИ: сб. науч. ст. — М., 2013. — Вып. № 255. — С. 86–110.
3. Rinolfi R., Imarisio R., Burati R. The potentials of a new common rail diesel fuel injection system for the next generation of DI diesel engines // 16 International Wiener Motorsymposium. VDI-Verlag Reihe 12. — № 239. — 1998. — P. 87–111.
4. Мазинг М.В., Курманов В.В. Топливная аппаратура для автомобильных дизелей экологического класса IV. // Труды НАМИ: сб. науч. ст. — М., 2013. — Вып. 252. — С. 32–41.
5. Common Rail Systems CRSN4 with 2,100 to 2500 bar for pressure amplifier // Robert Bosch Information. 2010. 2 p.
6. Leonard R., Parche M. Pressure-amplified common rail system for commercial vehicles // MTZ 05|2009 Vol. 70. — P. 10–15.
7. Detroit Diesel. N3- ACR Fuel System Amplified Common Rail. 2010. — 35 p.