

# Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.436.03.001

## Проектирование топливных насосов высокого давления для аккумуляторных систем дизелей

**Л.В. Грехов**

*Приведены подходы к проектированию важнейшего агрегата новых топливных систем с электронным управлением аккумуляторного типа. Рассмотрен выбор схемы насоса высокого давления, основные технические решения, проблемные элементы в условиях подачи под давлением до 200 МПа. Описана конструкция насосов, созданных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, и результаты их испытаний.*

**Ключевые слова:** дизель, топливный насос, аккумуляторная система, топливная система, высокое давление.

*The article considers the design methods of the most important part of new common rail accumulator electronic fuel supply systems. The selection of high pressure pump, main technical solutions and failure parts under the pressure up to 200 Mpa are discussed. The construction of pumps designed at the BMSTU and their test results are presented.*

**Keywords:** diesel, fuel pump, accumulator system, fuel system, high pressure.

Топливный насос высокого давления (ТНВД) относится к наиболее трудоемким в создании и дорогим в производстве компонентам аккумуляторных систем с электронным управлением — Common Rail (CR). Стоит задача создания простого, дешевого, надежного ТНВД, способного создавать давления до 200 МПа, а в ближайшем бу-



**ГРЕХОВ**  
Леонид Вадимович  
профессор кафедры  
«Поршневые двигатели»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

душем — и выше. До настоящего времени накоплен малый опыт их проектирования, отсутствуют отечественные промышленные образцы.

В системах до середины 1990-х годов применялись традиционные ТНВД или созданные на их базе, в том числе с несколькими участками подъема кулачка. Однако, это не лучшее решение, так как традиционные ТНВД применительно к СР обладают рядом недостатков: кулачковым приводом, архаичным способом регулирования производительности, неприменимы нагнетательные клапаны с разгружающим пояском, сам ТНВД получается громоздким, тяжелым, излишне сложным, дорогим и ненадежным. Тем не менее стереотипы старого живучи, а технологическая неподготовленность вынуждает отечественные и зарубежные фирмы отчасти идти по этому пути (рис. 1, а, б). Другая преюбилитность — применение роторных насосов на базе распределительных (см. рис. 1, а).

В промышленной гидравлике и гидроавтоматике применяют аксиальные насосы высокого давления (рис. 1, в). Они рассчитаны на максимальные давления 28...40 МПа в среде специальных масел, т. е. напрямую непригодны для СР.

В немецких системах R. Bosch, Siemens, L'Orang получили распространение ТНВД, komponуемые по звездообразной схеме (рис. 1, в), называемой в гидравлике радиально-плунжерной. Эти ТНВД отличаются равномерной нагрузкой на приводном валу, малыми габаритами и стоимостью.

При создании ТНВД в МГТУ им. Н.Э. Баумана было принято во внимание, что рядный ТНВД имеет более удобную для компоновки форму, более короткие соединительные каналы, меньшее число герметизируемых стыков в линии высокого давления, большие возможности использования традиционного оборудования при внедрении в производство. В целях повышения несущей способности привода плунжера кулачковый механизм с роликовым толкателем был заменен эксцентриковым с промежуточной втулкой, аналогичной представленной на рис. 1, в.

При регулировании производительности активным ходом плунжера, следует снабжать плунжер лишь одной верхней управляющей

кромкой. В ранних моделях насосов Bosch регулирование производительности осуществлялось блокированием впускного клапана. Позднее выбрали способ, обеспечивающий простоту и высокий КПД, — дросселирование на всасывании.

В ТНВД СР применяют различные виды нагнетательных клапанов. В любом случае должен отсутствовать разгружающий поясок. Минимальная масса и быстродействие присущи плоским и шариковым клапанам, однако для их производства требуется отлаженная технология. В ТНВД используют малогабаритные грибовидные клапаны. Вопрос о наличии впускных клапанов был решен отрицательно по соображениям принятого способа регулирования и обеспечения большей надежности: для наполнения плунжерных полостей используют окна втулок, а ход плунжера имеет запас.

К основным требованиям к ТНВД можно отнести возможность поддержания заданных на каждом режиме давления и производительности, в том числе на максимальных и пусковых частотах, максимальных температурах топлива, а также обеспечение динамического резерва в переходных режимах, заданного ресурса, быстрого регулирования. Как показала практика, для соблюдения этих требований необходима тщательная отработка конструкции, совершенная технология. При этом ТНВД должен быть дешевым и поэтому — конкурентоспособным.

К главным задачам, которые приходится решать при создании ТНВД СР, следует отнести обеспечение:

- наполнения плунжерной полости на высоких частотах;
- неразрывности кинематических связей на высоких частотах;
- производительности и давления на всех расчетных режимах;
- работоспособности подшипника втулки эксцентрика;
- ресурса нагнетательного клапана;
- температурных условий работы ТНВД.

Расчет необходимых давлений подачи для поля рабочих режимов [1] определяли методом оптимизации рабочего процесса дизеля по па-

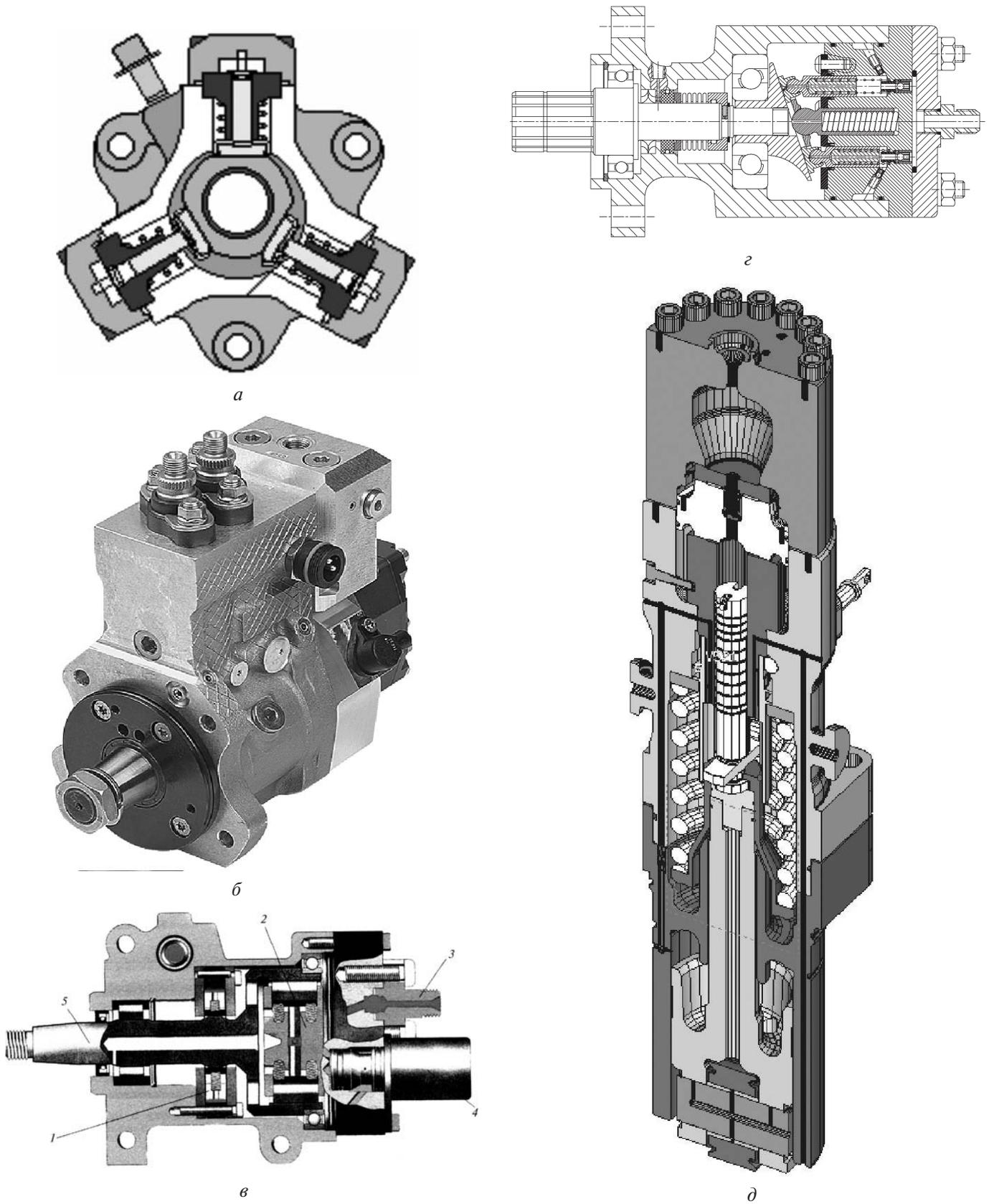


Рис. 1. ТНВД для CR:

*a* — радиально-плунжерный R.Bosch; *б* — рядный R.Bosch; *в* — роторный Delphi; *з* — аксиальный AVL; *д* — индивидуальный Sulzer

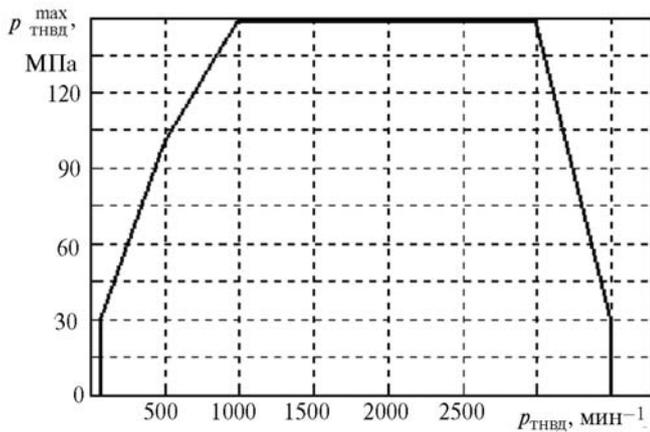


Рис. 2. Поле допустимых режимов работы ТНВД DCP фирмы Siemens

раметрам заданного экологического класса автомобиля согласно регламенту РФ. Расчет необходимой на каждом режиме работы производительности с учетом заданной внешней скоростной характеристики ведут с учетом расхода на управление, динамического резерва и др. [2]. Выбирая число и диаметр плунжеров, принимали во внимание качественный анализ факторов (табл. 1).

Наиболее нагруженный подшипник — втулки эксцентрика — может быть подшипником скольжения или игольчатый. В различных вариантах ТНВД в МГТУ им. Н.Э. Баумана использовали оба типа. Применение игольчатых подшипников в механизме привода плунжера ТНВД CR имеет ряд достоинств:

- возможность работы при высоких частотах вращения (до 8 000 мин<sup>-1</sup>);

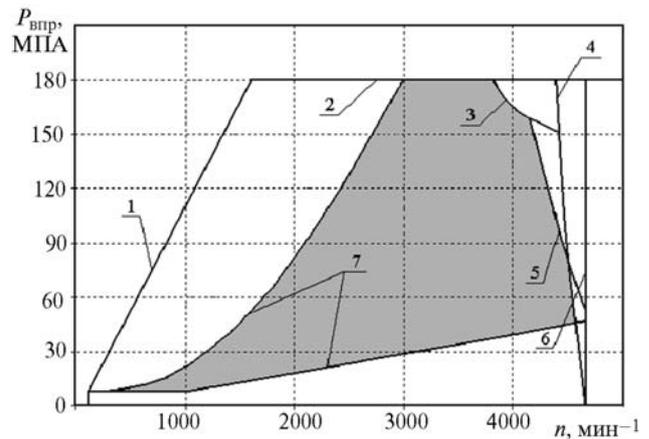


Рис. 3. Поле рабочих режимов ТНВД CR и его границы:

- 1 — работоспособность подшипника скольжения;
- 2 — раскрытие стыков; 3 — тепловыделение в подшипнике; 4 — работоспособность клапанов;
- 5 — наполнение; 6 — разрыв кинематических связей;
- 7 — оптимальные для рабочего процесса  $P_{впр}$

- высокая радиальная грузоподъемность при малых размерах и без применения дорогих материалов;
- пониженный расход смазочных материалов, простота смазывания;
- возможность работы при высоких нагрузках на малых частотах;
- малая чувствительность к вязкости смазывающего масла;
- простота изготовления и относительная дешевизна.

Расчет наполнения плунжерной полости, неразрывности кинематических связей, обеспеч-

Таблица 1

Анализ целесообразного числа секций ТНВД

Число секций	Достоинства	Недостатки
1	Надежность клапана; удобство отвода топлива; простота эксцентрикового привода, жесткий вал; большой коэффициент подачи	Высокая неравномерность подачи и момента; высокие нагрузки в приводе плунжера
2	Надежность клапанов; простота эксцентрикового привода	Неравномерность подачи и момента
3–4	Равномерность подачи; снижение нагрузок в приводе плунжеров	Сложность установки эксцентриковых втулок средних секций; снижение надежности клапанов; уменьшение жесткости вала; низкий коэффициент подачи

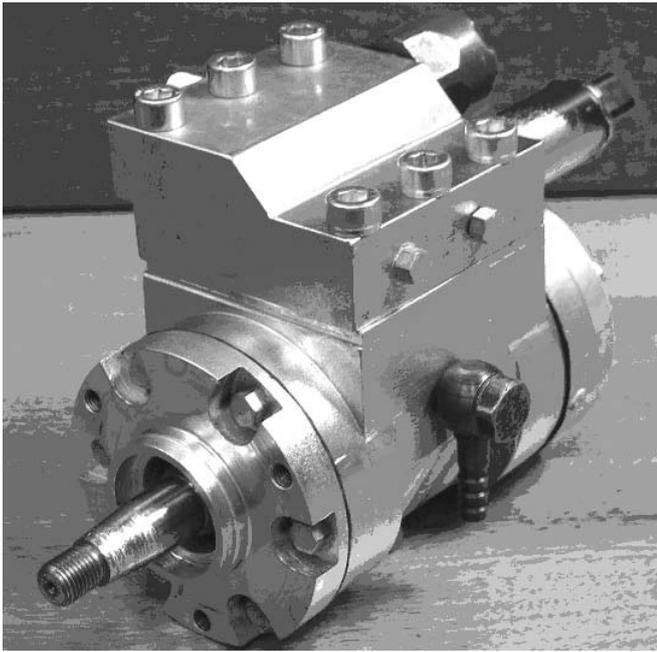


Рис. 4. ТНВД CR конструкции МГТУ им. Н.Э. Баумана четвертого поколения

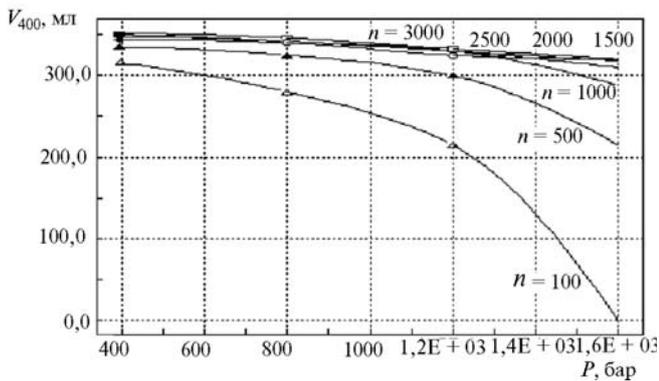


Рис. 5. Гидравлическая характеристика ТНВД при различных частотах вращения для объемной подачи  $V_{400}$  за 400 циклов

печенности производительности и давления на расчетных режимах велись с применением программного комплекса «Впрыск», разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана, расчет подшипников и клапанов — по известным инженерным методикам. Деформационная задача важнейших элементов ТНВД (корпус, эксцентриковая втулка, втулка плунжера, вал) решалась с использованием ПК ANSYS. Многообразие ограничений обуславливает поле рабочих режимов ТНВД. В качестве примера на рис. 2 приведены ограничительные кривые ТНВД DCP фирмы Siemens. Проведенные нами расчеты для ТНВД

дизеля ЗМЗ-5148.10 позволили сформировать поле его рабочих режимов (рис. 3). Оно показательно в отношении условий проектирования подобных ТНВД.

МГТУ им. Н.Э. Баумана на протяжении ряда лет ведет разработку ТНВД для систем CR. На рис. 4 представлен ТНВД четвертого поколения, а на рис. 5 — его гидравлические характеристики. Насос снабжен встроенным подкачивающим героторным насосом, клапанами, регулирующими давление и подачу, смазывался топливом. Гидравлические характеристики демонстрируют, что показатели качества ТНВД, как поршневого насоса, достаточно высоки и не уступают или превышают показатели испытанных нами ТНВД фирм R.Bosch и Siemens. Все экспериментальные данные приведены к условиям 40 °С, рабочие давления этого ТНВД составляют до 30...160 МПа. Созданный на той же платформе опытный насос продолжительно работал при давлениях подачи 200 МПа. Характеристика ТНВД приведена в табл. 2.

Таблица 2

Краткая техническая характеристика ТНВД CR, созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана

Диапазон рабочих давлений, МПа	30...200	
Диапазон рабочих частот, об/мин	50...3000	
Встроенный подкачивающий насос	Имеется	
Клапан электроуправления давлением	Имеется	
Клапан электроуправления производительностью	Имеется	
Импортозамещение ТНВД R.Bosch, Siemens	Обеспечено	
Параметры одного из вариантов ТНВД с двумя рабочими секциями:		
Цикловая подача (за оборот вала), мм <sup>3</sup>	720	
Объемный расход, л/мин (л/ч)	2,2 (130)	
Масса, кг	корпус из алюминиевых сплавов	5,5
	чугунный литой корпус	8,5
	стальной фрезерованный корпус	11,5

Моторные испытания подтвердили возможность работы дизеля ЗМЗ-5148.10 без изменения мощности, экономичности и величины вредных выбросов с отработавшими газами

при замене штатного ТНВД на опытный конструкции МГТУ им. Н.Э. Баумана (табл. 3). В данном случае лучший достигнутый результат рассматривался лишь как полное сохранение параметров снабжения топливом аккумулятора: как по абсолютному значению за счет ресурсов ТНВД и быстрой отработки команд управления, так и за счет непревышения колебаний давления в аккумуляторе. Действительно, в обоих случаях система управления в сочетании с ТНВД обеспечивала поддержание давления в аккумуляторе с погрешностью по амплитуде менее 0,7% при работе по всей внешней скоростной характеристике.

Таблица 3

Сравнение экологических показателей дизеля ЗМЗ-5148.10 при работе с различными ТНВД

Топливный насос высокого давления	Концентрации на номинальном режиме, ppm			Дымность, %
	суммарных углеводородов	оксида углерода	оксидов азота	
Siemens	50	243	1003	15...17
МГТУ	51	249	998	16...17

## Выводы

При проектировании ТНВД для CR необходимо изначально ориентироваться не на конвертацию старых, а на создание специальных простых, малогабаритных, дешевых насосов. Характерными техническими трудностями проектирования таких ТНВД являются работоспособность привода плунжеров, клапанов, органов управления. Эффективен привод плунжеров эксцентрик с обкатывающей толкатель-штулкой. Предпочтительна рядная компоновка секций. Созданный на основе разработанных принципов проектирования и методов расчета ТНВД обеспечил на дизеле полную взаимозаменяемость со штатным и выполнение норм экологического класса 4 технического регламента для автомобилей.

## Литература

1. Грехов Л.В., Кулешов А.С. Расчетное формирование оптимальных законов управления для программ электронных систем управления дизелями// Сб. науч. тр. по проблемам двигателестроения, посв. 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 138—143.
2. Грехов Л.В, Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелем. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. 344 с.

Статья поступила в редакцию 26.10.2011