

## **ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОПЛИВНОГО НАСОСА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ COMMON-RAIL**

**Грехов Л.В., Борисенко Н.Е., Потапов А.И., Малкин А.В., Рогов В.С.,  
Фонов В.В.** (МГТУ им. Н.Э.Баумана)  
**Миropyчев М.А., Павельев В.Н., Ильичев А.Г.** (ОАО “ЗМЗ”)

Статья из сборника:

Грехов Л.В., Борисенко Н.Е., Потапов А.И., Малкин А.В., Рогов В.С.,  
Фонов В.В., Миropyчев М.А., Павельев В.Н., Ильичев А.Г. Теория и прак-  
тика проектирования топливного насоса высокого давления для системы  
Common-Rail // Сб. науч. тр. по матер. Межд. конф. Двигатель-2007, посв.  
100-летию школы двигател. МГТУ им. Н.Э. Баумана – М.: МГТУ им. Н.Э.  
Баумана, 2007. – С. 284-289.

Топливный насос высокого давления (ТНВД) относится к наиболее  
трудоемким в создании, 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 будущем – и выше.

В системах до середины 90-х годов применялись традиционные  
ТНВД или созданные на их базе, в том числе с несколькими участками  
подъема кулачка. Однако, это не лучшее решение, т.к. традиционные  
ТНВД применительно к CR обладают рядом недостатков: кулачковым  
приводом, архаичным способом регулирования производительности, не-  
применимы нагнетательные клапаны с разгружающим пояском, сам ТНВД  
получается громоздким, тяжелым, излишне сложным, дорогим и ненадеж-  
ным. Тем не менее стереотипы старого живучи, а технологическая него-  
товность вынуждает отечественные и зарубежные фирмы отчасти идти по  
этому пути (рис. 1,а,б). Другая преимущество – применение роторных  
насосов на базе распределительных (рис. 1,д).

В промышленной гидравлике и гидроавтоматике применяются акси-  
альные насосы высокого давления (рис. 1,г). Они рассчитаны на макси-  
мальные давления 28...40 МПа в среде специальных масел, т.е. напрямую  
непригодны для CR.

В немецких системах CR Bosch, Siemens, L'Orange получили распро-  
странение ТНВД, компонованные по звездообразной схеме (рис. 1,в), назы-  
ваемой в гидравлике радиально-плунжерной. Они отличаются равномер-  
ной нагрузкой на приводном валу, малыми габаритами и стоимостью.

При создании ТНВД МГТУ 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 рис. 1,в.

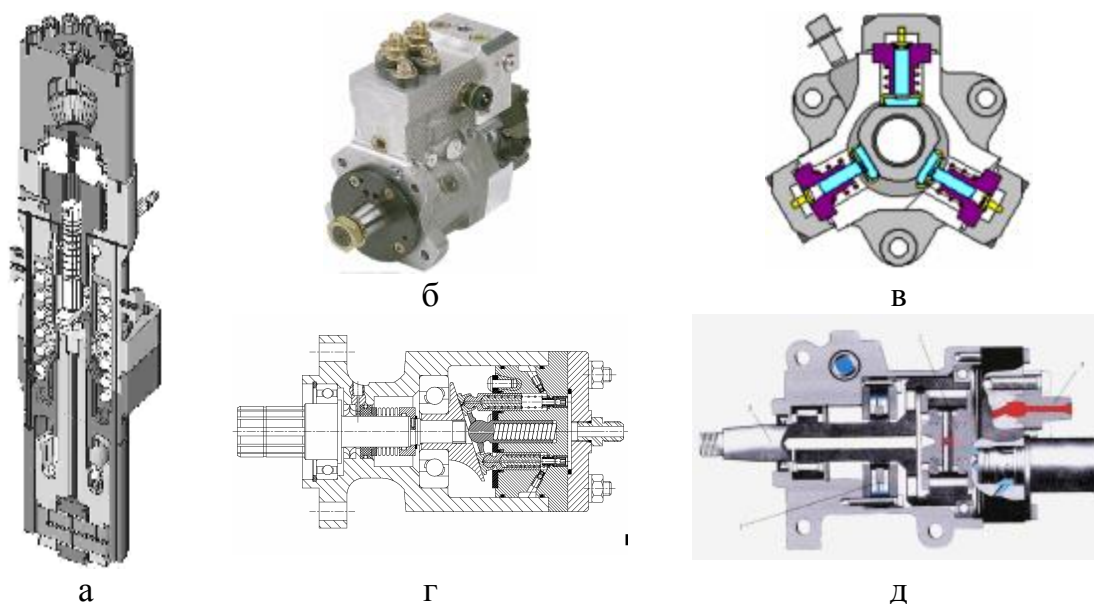


Рис. 1. ТНВД для CR: а–индивидуальный Sulzer; б–рядный R.Bosch; в–радиально-плунжерный R.Bosch; г–аксиальный AVL; д–роторный Delphi

При регулировании производительности активным ходом плунжера, плунжер следует снабжать лишь одной верхней управляющей кромкой. В ранних моделях насосов Bosch регулирование производительности осуществлялось блокированием впускного клапана. Выбор остановился на способе, обеспечивающем простоту и высокий КПД - дросселированием на всасывании.

В ТНВД CR применяются 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 применены малогабаритные грибовые клапаны. Вопрос о наличии впускных клапанов был решен отрицательно по соображениям принятого способа регулирования и обеспечения большей надежности: для наполнения плунжерных полостей используются окна втулок, а ход плунжера имеет запас.

Укрупнено к существенным требованиям к ТНВД можно отнести возможность поддержания заданных на каждом режиме давления и произ-

водительности, 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, выдерживание этих требований требует тщательной отработки конструкции, совершенной технологии. При этом ТНВД должен быть дешевым и поэтому - конкурентоспособным.

Можно выделить крупные задачи, которые приходится решать при создании ТНВД СР. К их числу следует отнести:

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

Расчет необходимых давлений подачи для поля рабочих режимов [1] определялось методом оптимизации рабочего процесса дизеля по параметрам заданного экологического класса автомобиля согласно регламенту РФ. Расчет необходимой на каждом режиме работы производительности с учетом заданной внешней скоростной характеристики ведется с учетом расхода на управление, динамического резерва и др. [2]. Выбирая число и диаметр плунжеров принимался во внимание качественный анализ факторов (табл. 1).

Таблица 1. Анализ целесообразного числа секций ТНВД

Число секций	Достоинства	Недостатки
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>● надежность клапана</li> <li>● удобство отвода топлива</li> <li>● простота эксцентрикового привода, жесткий вал</li> <li>● большой коэффициент подачи</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● высокая неравномерность подачи и момента</li> <li>● высокие нагрузки в приводе плунжера</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>● надежность клапанов</li> <li>● простота эксцентрикового привода</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● неравномерность подачи и момента</li> </ul>
3...4	<ul style="list-style-type: none"> <li>● равномерность подачи</li> <li>● снижение нагрузок в приводе плунжеров</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● сложность установки эксцентриковых втулок средних секций</li> <li>● падает надежность клапанов</li> <li>● уменьшается жесткость вала</li> <li>● меньше коэффициент подачи</li> </ul>

Наиболее нагруженный подшипник – втулки эксцентрика – может быть скольжения или игольчатый. В различных вариантах ТНВД МГТУ

использовались оба типа. Использование игольчатых подшипников в механизме привода плунжера ТНВД CR имеет ряд достоинств:

- возможность работы при высоких частотах вращения (до  $8000 \text{ мин}^{-1}$ );
- 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, обеспеченности производительности и давления на расчетных режимах велось с применением программного комплекса Впрыск разработки МГТУ им. Н.Э.Баумана. Расчет подшипников и клапанов – по известным инженерным методикам. Деформационная задача важнейших

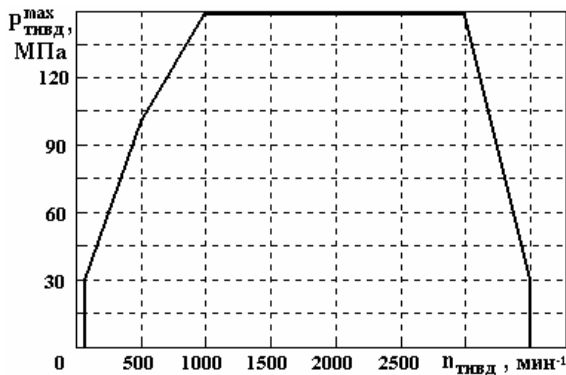


Рис. 2. Поле допустимых режимов работы ТНВД DCP Siemens

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 для дизеля ЗМЗ-5148.10

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

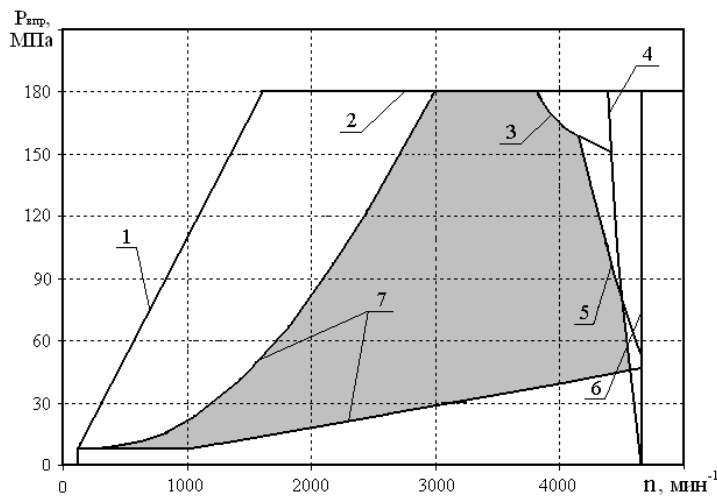


Рис. 3. Поле рабочих режимов ТНВД CR и его границы: 1-работоспособность подшипника скольжения; 2- раскрытие стыков; 3- тепловыделение в подшипнике; 4- работоспособность клапанов; 5- наполнение; 6- разрыв кинематических связей; 7- оптимальные для рабочего процесса  $P_{впр}$

МГТУ на протяжении ряда лет ведет разработку ТНВД для систем CR. На рис. 4 представлен ТНВД 4-го 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 показателям испытанных нами ТНВД фирм R.Bosch и Siemens. Все экспериментальные данные приведены к условиям 40<sup>0</sup>С. Рабочими давлениями этого ТНВД являются до 30...160 МПа. Созданный на той же платформе опытный насос продолжительно работал при давлениях подачи 200 МПа. Характеристика ТНВД приведена в табл. 2.



Рис. 4. ТНВД CR четвертого поколения.

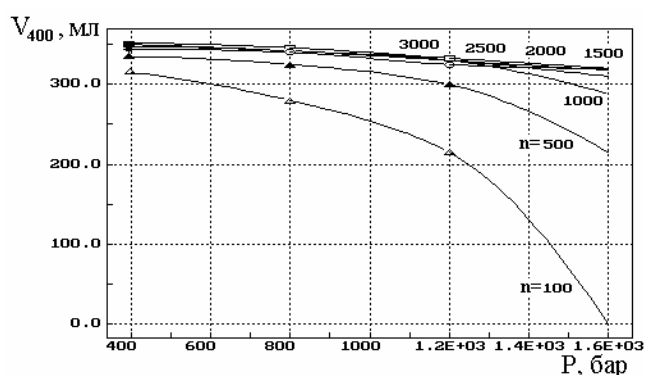


Рис. 5. Гидравлическая характеристика ТНВД при различных частотах вращения. Объемная подача – за 400 циклов.

Таблица 2. Краткая техническая характеристика ТНВД CR МГТУ

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/час)		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 ОГ при замене штатного ТНВД на опытный конструкции



МГТУ (табл. 3). В данном случае лучший достигнутый результат рассматривался лишь полное сохранение параметров снабжения топливом высокого давления аккумулятора: как по абсолютному значению за счет ресурсов ТНВД и быстрой отработки команд управления подачей того же блока управления, так и за счет неперевышения колебаний давления в аккумуляторе (рис.6).

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

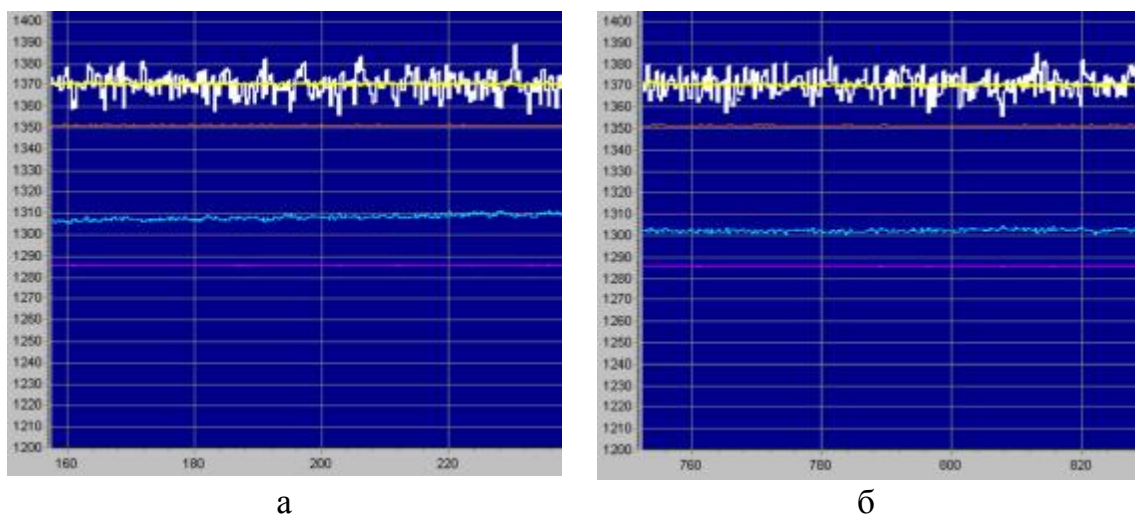


Рис. 6. Установочное (почти постоянное) и реальное (с колебаниями) значение  $P_{акк}$  на режиме ВСХ при  $n=2500 \text{ мин}^{-1}$  при испытании дизеля с ТНВД Siemens (а) и с опытным ТНВД (б).

Таким образом, проектирование ТНВД для Common Rail должно изначально ориентироваться не на конвертацию из старых, а на создание специального простого, малогабаритного, дешевого насоса. При этом должны быть решены характерные технические трудности, включая обеспечение работоспособности привода плунжеров, клапанов, органов управления и др. Созданный на основе разработанных принципов проектирования и методов расчета ТНВД обеспечил на дизеле полную взаимозаменяемость со штатным.

**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.: 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: Учебник для вузов.- Москва: Изд-во Легион-Автодата, 2004., ил – 344 с.