

затянутого окончания подачи. Важно, что изменением соотношений размеров клапана и седла можно управлять величиной и знаком небольшой неуравновешенной гидравлической силы, обеспечивая ускорение либо закрытия, либо открытия клапана и общим быстродействием.

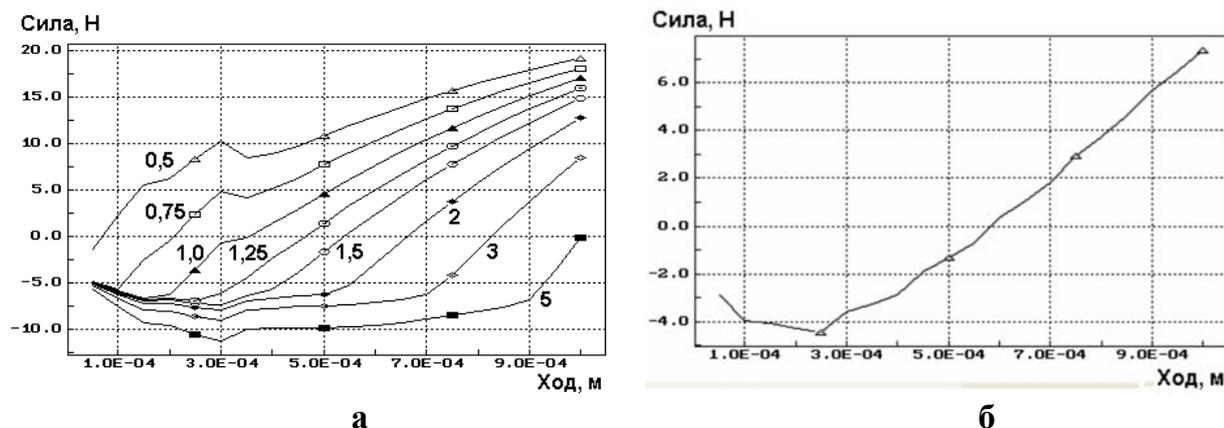


Рис. 7. Неуравновешенная (открывающая) сила в функции хода клапана $d_{пл}=10$ мм: а - расчетная для различных $k_{корр}$; б - экспериментальная

Литература:

1. 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.
2. Вырубов Д.Н. Физические характеристики дизельных топлив, определяющих процессы топливоподачи // Дизелестроение. - 1935, № 8.
3. Бекнев В.С., Панков О.М., Янсон Р.А. Газовая динамика газотурбинных и комбинированных установок. – М.: Машиностроение, 1973. – 335 с.

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)
Миронычев М.А., Павельев В.Н., Ильичев А.Г. (ОАО “ЗМЗ”)

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, неприменимы нагнетательные клапаны с разгружающим пояском, сам ТНВД получается громоздким, тяжелым, излишне сложным, дорогим и ненадежным. Тем не менее стереотипы старого живучи, а технологическая неготовность вынуждает отечественные и зарубежные фирмы отчасти идти по этому пути (рис. 1,а,б). Другая преемственность – применение роторных насосов на базе распределительных (рис. 1,д).

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

В немецких системах CR Bosch, Siemens, L'Orange получили распространение ТНВД, компоуемые по звездообразной схеме (рис. 1,в), называемой в гидравлике радиально-плунжерной. Они отличаются равномерной 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.

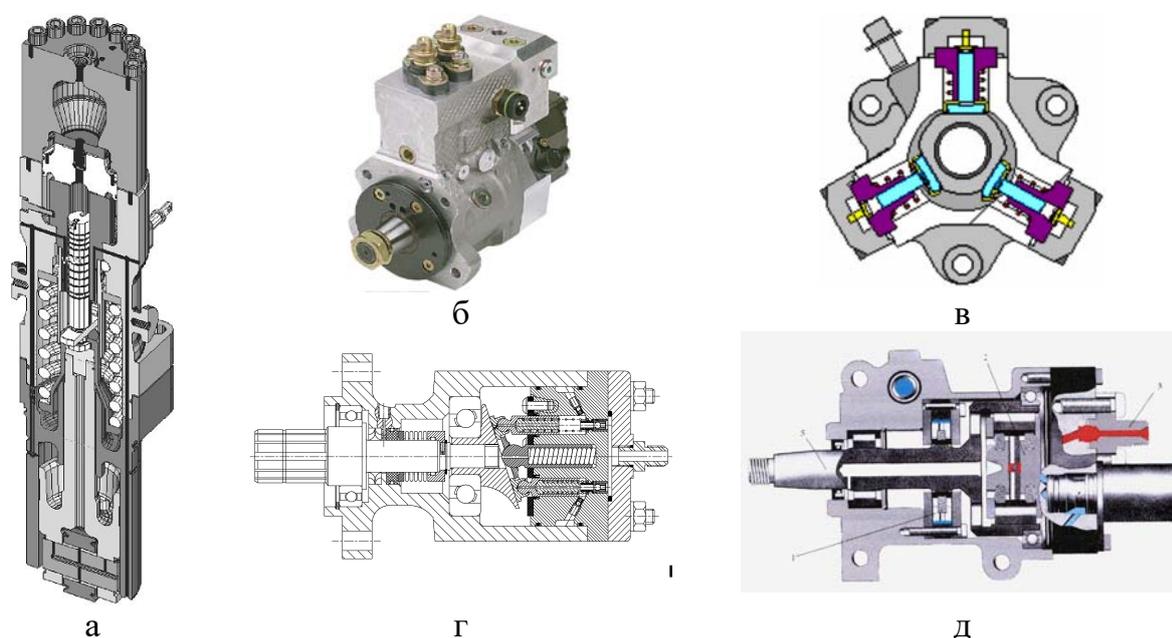


Рис. 1. ТНВД для CR: а–индивидуальный Sulzer; б–рядный R.Bosch; в–радиально-плунжерный R.Bosch; г–аксиальный AVL; д–роторный Delphi

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

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 СР имеет ряд достоинств:

- возможность работы при высоких частотах вращения (до 8000 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 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.

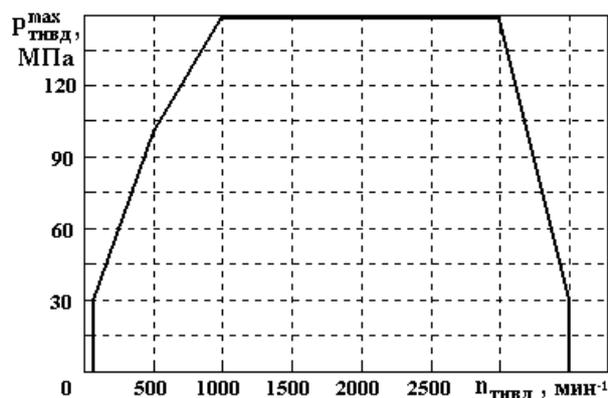


Рис. 2. Поле допустимых режимов работы ТНВД DCP Siemens

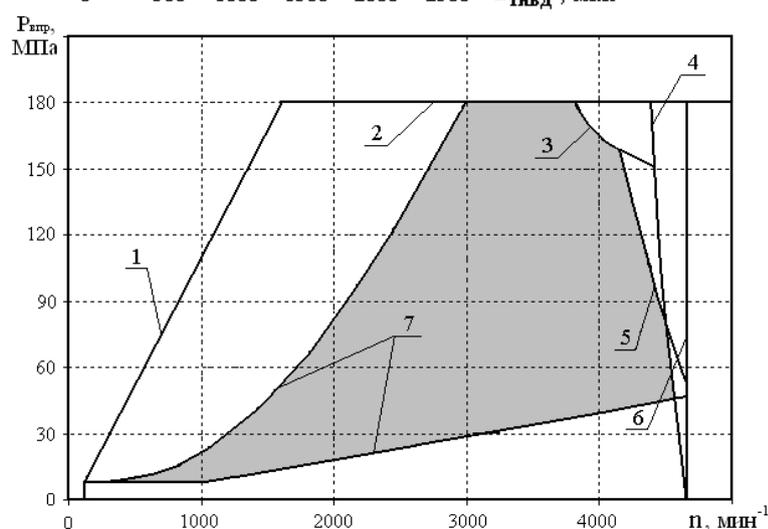


Рис. 3. Поле рабочих режимов ТНВД CR и его границы: 1-работоспособность подшипника скольжения; 2- раскрытие стыков; 3- тепловыделение в подшипнике; 4- работоспособность клапанов; 5-наполнение; 6- разрыв кинематических связей; 7- оптимальные для рабочего процесса $P_{впр}$

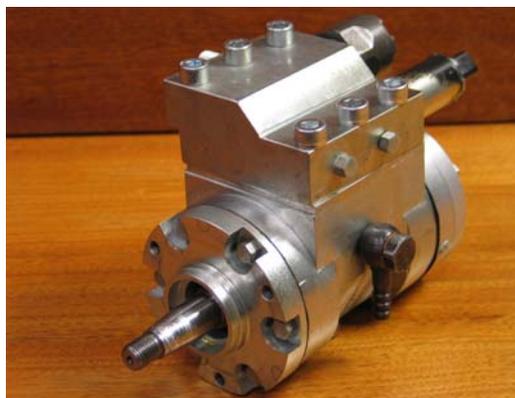


Рис. 4. ТНВД CR четвертого поколения.

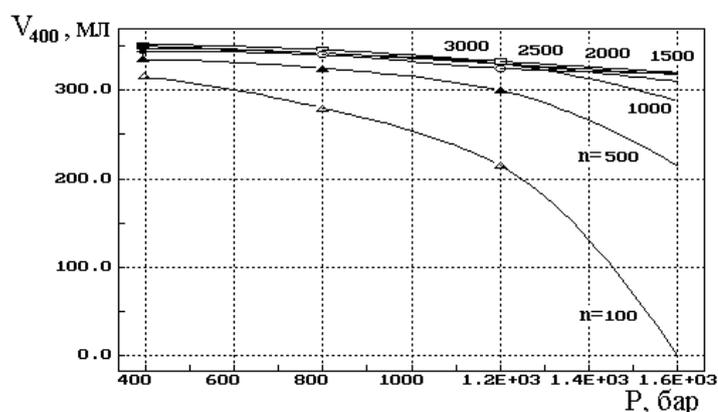


Рис. 5. Гидравлическая характеристика ТНВД при различных частотах вращения. Объемная подача – за 400 циклов.

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 снабжался 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°C. 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.

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 ³		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

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.

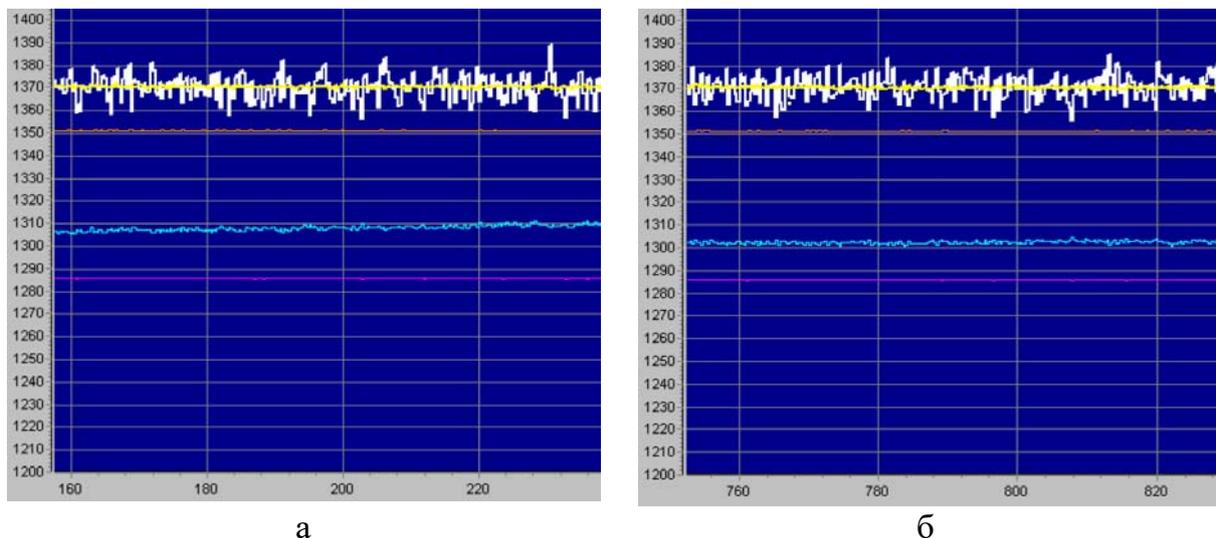


Рис. 6. Установочное (почти постоянное) и реальное (с колебаниями) значение $P_{акк}$ на режиме ВСХ при $n=2500 \text{ мин}^{-1}$ при испытании дизеля с ТНВД Siemens (а) и с опытным ТНВД (б).

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.

РАСЧЕТ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОЦЕССА В ПРИВОДЕ КЛАПАНА ДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

**Грехов Л.В., Атаманов В.И., Борисенко Н.Е., Потапов А.И., Малкин А.В., Рогов В.С. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Фурман В.В. (ООО “ППП Дизельавтоматика”)**

С широким внедрением электронного управления работой дизелей вопросы проектирования быстродействующих электромагнитных приводов стал более, чем актуальным. Пока они остаются основными во всех новых системах: в насос-форсунках, распределительных, индивидуальных ТНВД, аккумуляторных системах [1].

Классические методы расчета и проектирования, созданные, очевидно, в докомпьютерную эпоху, непригодны ввиду несоответствия рассматриваемых простейших переходных процессов, используемым в практике законам управления [2]. Концепция предлагаемого способа отработки конструкции – оптимизация электромагнитного привода на базе математических моделей, описывающих прямую задачу, а не путем использования многочисленных, но недостоверных методик, созданных для задач синтеза. Такой подход обоснован и по другой важной причине: модель привода встраивается в общий гидродинамический расчет процесса подачи и, с одной стороны, базируется на однотипных уравнениях, удобно решаемых вместе с остальными, а с другой, позволяет, таким образом, решать сопряженную гидромеханическую и электромагнитную задачу о поведении управ-