

На правах рукописи  
УДК 621.436



Потапов Андрей Иванович

**РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ВЫСОКОНАПОРНОГО  
ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА ДЛЯ МАЛОТОКСИЧНЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Специальность 05.04.02 - Тепловые двигатели

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Грехов Леонид Вадимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Драгомиров Сергей Григорьевич

кандидат технических наук,  
Дубренский Сергей Валерьевич

Ведущее предприятие: ОАО «ДААЗ»

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " июня 2011 г. в 14-00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.141.09 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д.2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э.Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.09.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " мая 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент

**Тумашев Р.З.**

## ОБЩИЕ ПО ТЕКСТУ СОКРАЩЕНИЯ

СНВТ – система непосредственного впрыскивания топлива;  
CR – топливная система Common Rail;  
ТНВД – топливный насос высокого давления;  
ТПА – топливоподающая аппаратура;  
ТПН – топливоподкачивающий насос.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В развитии автомобильных двигателей с искровым зажиганием важную роль играет совершенствование систем питания. Наряду с традиционными системами подачи топлива во впускной коллектор, всё большее значение приобретают работы по созданию и внедрению новых систем питания – систем непосредственного впрыскивания бензина (СНВТ). Ужесточение норм токсичности, в частности введение в РФ более строгих нормативов для двигателей самого различного назначения, ставит под сомнение возможность дальнейшего существования двухтактного бензинового двигателя, оснащаемого карбюратором. Очевидным решением проблем таких двигателей, связанных с высоким расходом топлива и токсичностью отработанных газов, является создание и использование СНВТ. Идея подачи топлива после перекрытия выпускных (продувочных) органов давно привлекала внимание специалистов. Однако создание и производство такой аппаратуры для малолитражных двухтактных двигателей с искровым зажиганием наталкивалось на ряд проблем.

Апробированные технологии расчетного анализа рабочего процесса и топливоподачи, применяемые для дизелей, не всегда эффективны для проектирования СНВТ. Отсутствие опыта работ с малыми цикловыми подачами, высокие частоты вала ТНВД, худшее смазывание прецизионных деталей топливом не позволяют проектировать СНВТ простым масштабированием дизельной ТПА. Также очевидно, что в бензиновом двигателе давления впрыскивания имеет иной оптимальный уровень. Это вносит существенные коррективы в конструкцию топливного насоса высокого давления и форсунки и обуславливает необходимость своей компьютерной оптимизации ТПА и рабочего процесса двигателя с СНВТ.

При создании новой ТПА типа Common Rail для дизелей традиционно меньше внимания уделялось проектированию ТНВД, хотя он является самым дорогим и важнейшим узлом системы. Эта задача остается актуальной.

Цель работы: разработка методов проектирования и создание макетных образцов высоконапорной топливной аппаратуры нового поколения для перспективных отечественных двигателей.

Научная новизна результатов работы усматривается в следующем:

- разработаны дополнения к математической модели гидромеханических

процессов, специфичных для условий подачи легкокипящих маловязких топлив в условиях двухфазности и повышенных давлений;

- сформулированы требования для оптимизации СНВТ;
- в сравнительном исследовании выявлены достоинства и недостатки различных СНВТ;
- разработаны теоретические основы проектирования элементов СНВТ (ТПН, форсунок);
- разработаны основы проектирования ТНВД Common Rail и СНВТ.

Методы исследования. Математическое моделирование, включая расчеты и оптимизацию СНВТ и ТНВД CR, проводились с использованием программного обеспечения, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана и усовершенствованного в части адекватного описания процессов в новых топливоподающих системах. Экспериментальное исследование проводилось на безмоторных топливных стендах МГТУ им. Н.Э. Баумана и на моторных испытательных стендах ОАО «Русская механика», ОАО «ЗМЗ», ОАО «НИКТИД», ОАО «ДААЗ».

Достоверность и обоснованность научных положений работы обуславливаются:

- использованием общих уравнений механики, гидродинамики, теплофизики, термодинамики, а также их соответствием выявленным особенностям протекания физических процессов;
- соответствием расчетных результатов экспериментально зарегистрированным;
- применением современных точных средств измерения параметров топливоподачи и апробированных стендов и методик испытаний топливной аппаратуры;
- согласованием частных полученных результатов с ранее известными.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- усовершенствована модель и программа для расчета и оптимизации топливных систем аккумуляторного типа и непосредственного действия для подачи различных топлив;
- даны рекомендации по выбору типов элементов СНВТ;
- разработаны эффективные конструкции СНВТ и ТНВД дизельной CR;
- созданы технологически оправданные образцы СНВТ и ТНВД CR, отвечающие перспективным требованиям к ДВС;
- разработаны рекомендации и методы расчета СНВТ и ТНВД CR;
- подтверждена возможность и целесообразность применения СНВТ для малоразмерных двухтактных двигателей.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- дополнения к математической модели гидромеханических процессов для исследований и оптимизации впрыскивающих топливных систем в части управления производительностью ТНВД, описания поведения лёгкого топлива, в том числе с газообразованием;

- сформулированные требования к СНВТ в плане обеспечения условий распыливания и обоснования способа управления мощностью двигателя
- математическая модель течения в вихревой форсунке СНВТ, результаты сравнительных исследований форсунок различных схем и предложения их усовершенствованию;
- выявленные ограничительные факторы при проектировании СНВТ и ТНВД СР, способы их оценки;
- методика расчета производительности СНВТ и ТНВД СР и рекомендации по их проектированию;
- образец СНВТ для двухтактного быстроходного двигателя и образцы перспективного ТНВД СР для быстроходного дизеля.

Реализация работы. Результаты работы в части расчетной оптимизации конструкции СНВТ и ТНВД СР использовались в ОАО «ЗМЗ», ОАО «УМЗ», ОАО НИКТИД, ОАО «Русская механика», ОАО «ДААЗ», ОАО «АвтоВАЗ».

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на юбилейной научно-технической конференции, посвященной 175-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана (г. Москва, 2005 г.), юбилейной научно-технической конференции, посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2007 г.), на международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана а также НТС ОАО ДААЗ и ОАО «Русская механика», а также на заседании кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ и получен один патент РФ, из них согласно перечню ВАК – 1.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, заключения, списка литературы, приложений. Она включает 180 страниц основного текста, содержащего 29 таблиц и 87 рисунков, 4 приложения, а также 13 страниц списка литературы из 136 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность данной работы, изложена общая характеристика работы.

В первой главе представлен анализ известных разработок по системам непосредственного впрыскивания топлива и сформулированы задачи исследования. Проанализированы тенденции развития ТПА и влияние работы ТПА на экологические, экономические и мощностные показатели как бензиновых, так дизельных двигателей. Рассмотрены основные узлы и агрегаты СНВТ с механическим регулированием.

На основании выполненного анализа состояния современных ТПА и требований, предъявляемых к ним, сформулированы следующие задачи исследования:

- разработать конструкцию СНВТ, отвечающую экономическим и эко-

логическим требованиям современного двухтактного ДВС.

- разработать и уточнить существующие математические модели для расчетно-исследовательских и оптимизационных работ применительно к подаче легкокипящих маловязких топлив и под повышенными давлениями.

- создать математические модели для описания процессов в элементах СНВТ, провести расчётное исследование и оптимизацию элементов СНВТ.

- спроектировать и изготовить СНВТ.

- подготовить топливные системы для осуществления сравнительных испытаний двухтактного двигателя с карбюратором и СНВТ.

- провести анализ проблем конструирования и предложить методы проектирования эффективных подкачивающих насосов для топливных систем.

- разработать конструкции ТНВД и изготовить опытные варианты для нужд СНВТ и Common Rail автомобильного дизеля.

- провести безмоторные (моторные) испытания бензинового и дизельного ТНВД.

- обобщить опыт конструирования новой высоконапорной ТПА.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процесса топливоподачи СНВТ и высоконапорными дизельными системами.

Математическая модель базируется на апробированных разработках отечественных ученых. Ядром модели является задача о течении в трубопроводе. Нестационарное одномерное изотермическое течение вязкой сжимаемой жидкости с допущением  $U \ll \alpha$  и  $\Delta p \ll \rho$  описывается уравнениями движения и неразрывности:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= -KU; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial U}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $U$  – скорость,  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $K$  – диссипативный множитель,  $x$  – координата,  $t$  – время.

Коэффициент сопротивления  $\lambda$  вычисляется для нестационарного импульсного движения по соотношениям, полученным в МГТУ. Также учитываются местные сопротивления на концах трубопроводов.

Аналитическое решение Д'Аламбера для волнового уравнения:

$$P_x = P_{ак} + F_x - W_x; \quad U_x = [F_x + W_x] / \alpha \rho, \quad (2)$$

где значения прямой  $F_x$  и обратной  $W_x$  волн на координате  $x$ , дополнено поправкой Т.Ф. Кузнецова для учета диссипации волн:

$$F_x = F_{x=0} \left( t - x/\alpha \right) \cdot e^{-Kx/\alpha}; \quad W_x = W_{x=L} \left[ t - (L - x)/\alpha \right] \cdot e^{-K(L-x)/\alpha}.$$

Выражения для формулировки граничных условий записываются в виде уравнений объемного баланса для полостей и уравнений движения для регулирующих механических элементов. Уравнение объемного баланса топлива в  $i$ -й полости в общем виде:

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{1}{V_i \beta_i^{\text{эф}}} \left[ \sum Q_{i-k} + \sum U_{i-j} f_j + \sum \frac{dV_{i-n}}{dt} \right], \quad (3)$$

где  $P_i$ ,  $V_i$  – текущие давление, объем;  $\beta_i^{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент сжимаемости, вычисленный с учетом деформации стенок;  $Q_{i-k}$  – расход топлива из  $k$ -ой полости,  $U_{i-j}$  – скорость втекания из  $j$ -го канала,  $V_{i-n}$  – изменение объема от движения  $n$ -го элемента.

Универсальная математическая модель позволяет моделировать топливные системы всех типов, различного состава и назначения.

Для анализа упругих свойств однофазных и двухфазных смесей в СНВТ удобно использовать уравнение связи (с сохранением возможности вычисления коэффициента сжимаемости):

$$\left(\rho/\rho_{0t}\right)^{\varkappa} = (B + P)/B \quad (4)$$

Для него экспериментально методом измерения скорости звука уточнены постоянные  $B$  и  $\varkappa$ . Так для дизельного топлива

$$\left. \begin{aligned} B &= 10^6 \cdot [184 - 0,851(t - 20) + 0,44(\rho_{20} - 825)] \\ \varkappa &= 7,5 + 0,0141(t - 20) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

а для бензина, при  $t < 80$  °С:

$$\varkappa = 7,2503 + 25,9 \cdot 10^{-9} P; \quad B = 10^6 \cdot [127,33 - 353 \cdot 10^{-9}]. \quad (6)$$

В обоих технических приложениях – как в ТНВД СР, так и в ТНВД систем непосредственного впрыскивания предлагалось использовать для регулирования производительности управляемое наполнение плунжерной полости методом дросселирования на всасывании. Для высокооборотных ТНВД СНВТ и систем СР, как с впускными клапанами, так и с впускными окнами, возникла необходимость оценки полноты наполнения надплунжерных полостей. В соответствии с методикой И.В.Астахова-Л.Н.Голубкова для быстроты счета использовались следующие соотношения: для  $P_{\text{пл}} > P_{\text{н.п.}}$ ,  $V_{\text{пл}}^{\text{газ}} = 0$ :

$$\frac{dP_{\text{пл}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{пл}} \beta_{\text{пл}}^{\text{эф}}} \left[ f_{\text{пл}} \cdot dh_{\text{пл}}/dt - Q_{\text{вп}} - Q_{\text{пл}}^{\text{утеч}} - Q_{\text{клап}}^{\text{нагнет}} - f_{\text{кл}} \cdot dh_{\text{кл}}/dt \right]; \quad (7)$$

Для  $P_{\text{пл}} = P_{\text{н.п.}}$ ,  $V_{\text{пл}}^{\text{газ}} > 0$

$$\frac{dV_{\text{пл}}^{\text{газ}}}{dt} = - \left[ f_{\text{пл}} \cdot dh_{\text{пл}}/dt - Q_{\text{вп}} - Q_{\text{пл}}^{\text{утеч}} - Q_{\text{клап}}^{\text{нагнет}} - f_{\text{кл}} \cdot dh_{\text{кл}}/dt \right]. \quad (8)$$

Выражения (7), (8) применялись как для случая ликвидации, так и образования газовой фазы. Практически они позволяют оценивать и минимизировать газообразование при наполнении к началу нагнетания, а с другой стороны, для СНВТ оптимизировать параметры органов управления.

Ввиду малой вязкости бензина и важности оценки утечек в распылителе и плунжерной паре, для их расчета используем наиболее точные и общие формулы, полученные в работах МГТУ. Для распылителя и утечек по цилиндрической поверхности плунжера:

$$Q_{ут} = \frac{\pi \delta^3 d_{и} P_0}{12 L_{и} \eta_0 \ln c} \left( \frac{1}{c^{P_{н}/P_0}} - \frac{1}{c^{P_{ф}/P_0}} \right) + 0,5 \pi V_{и} \delta d_{и}, \quad (9)$$

где  $d_{и}$ ,  $L_{и}$ ,  $V_{и}$  - диаметр, длина уплотняющей части и скорость цилиндрического тела (иглы);  $P_{ф}$ ,  $P_{н}$ ,  $P_0$  - давление в данной полости, в полости, в которую происходят перетечки, атмосферное давление. Под  $\eta_0$  понимается вязкость при действительной температуре в зазоре при атмосферном давлении.

Формула утечек через окна втулки плунжера:

$$Q_{ут}^{окна} = \frac{\pi \delta^3 P_0}{6 \eta_0 \ln c} \left( 1 - \frac{1}{c^{P_{пл}/P_0}} \right) \cdot \frac{i_{вп}}{\ln [4 \cos \beta_{вп} (h_{пл} - h_{пл}^{вп} - d_{вп}) / d_{вп}]}, \quad (10)$$

где  $h_{пл}$ ,  $h_{пл}^{вп}$ ,  $\beta_{вп}$ ,  $d_{вп}$  - подъем плунжера, подъем начала закрытия впускного окна, наклон верхней кромки плунжера, диаметр впускного окна.

Суммарные утечки в плунжерной паре:

$$Q_{ут}^{сумм} = Q_{ут}^{окна} + Q_{ут}. \quad (11)$$

Получено выражение для оценки теплового состояния топлива для полостей ТПА с учетом теплоотдачи, тепловыделения, адиабатического сжатия, потока теплоты с втекающим топливом и тепловыделения при дросселировании.

Сравнение расходов топлива и воздуха через двигатель с известными сопутствующими выражениями приводит к соотношению, позволяющему обосновать возможность простого пневмомеханического управления производительностью ТНВД в СНВТ для целей регулирования мощности в поле рабочих режимов. Так, для разрабатываемой конструкции регулирующего органа с сечением  $\mu f_{регул}$ , дросселирующего топливо на наполнении ТНВД, получено соотношение в функции разрежения  $\Delta p_d$  в мерном диффузоре с сечением  $\mu_d f_d$ :

$$\mu f_{регул} = \frac{\mu_d f_d \sqrt{\rho_v \Delta p_d}}{\alpha l_0 \sqrt{\rho_t p_{подк}}}. \quad (12)$$

В развитие выражений (4)-(6) получены более точные выражения для плотности, коэффициента сжимаемости, массового расхода смесей газов и, возможно, нескольких жидких топлив. Так, наиболее короткое выражение для плотности, иллюстрирует механизм управления подачей путем дросселирования на всасывании насоса:

$$\rho_{см} = \rho_{см0} \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^k \varepsilon_{j0} \left( \frac{B+p}{B} \right)^{\frac{1}{n_j}} + \varepsilon_{r0} \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{n_r}}}. \quad (13)$$

А именно, различия в законах описания упругих свойств фаз и разница в константах ( $B \gg P_0$  и  $\chi \gg n_r$ ) приводит к тому, что при понижении давления все большую роль (и место в смеси) занимают воздух и пары топлива.

Обосновано, что в двигателях с СНВТ целесообразно использовать вихревые форсунки. Применив в качестве исходного дифференциальное уравнение гидростатики – Эйлера:



$$dp_{\text{випр}} = \rho(Xdx + Ydy + Zdz), \quad (14)$$

с привлечением соотношений для гидравлических потерь в каналах, получены соотношения для рациональных параметров тангенциальной закрутки потока при течении бензина в выходном участке распылителя вихревой форсунки (рис. 1).

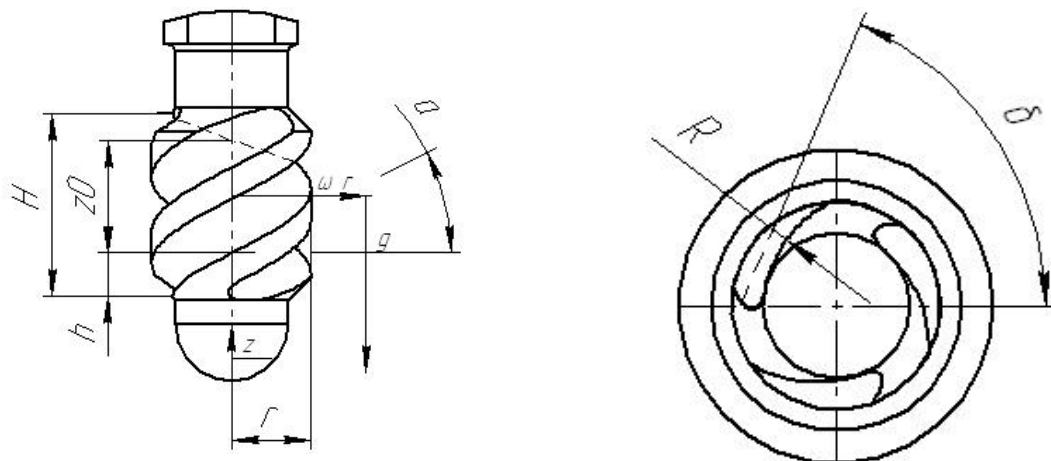


Рис. 1. Расчетная схема для определения потери давления в нормальной закрытой форсунке с использованием иглы с винтовыми канавками

Третья глава посвящена расчетно-теоретическому исследованию ТПА и разработке эффективной ТПА.

Выбор схемы и базовых технических решений при проектировании ТНВД для систем непосредственного действия и СР осуществлен исходя из соображений обеспечения необходимой производительности, работоспособности всех элементов ТНВД, повышения равномерности крутящего момента на валу ТНВД, обеспечения конструктивных, технологических, эксплуатационных и экономических требований.

Определение параметров ТНВД СР производилось применительно к дизелю – ЗМЗ-5148.10 (дизель ОАО «ЗМЗ» экологического класса 4).

Минутный объемный расход топлива для подачи в цилиндры на номинальном режиме дизеля:

$$Q_{\text{теор.ном.}} = \frac{2n_{\text{коленч}} i_{\text{цил}} g_{\text{ц.ном}}}{(\rho_{\text{т}} \tau)}, \quad (15)$$

где  $n_{\text{коленч}}$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $i_{\text{цил}}$  – число цилиндров;  $g_{\text{ц.ном}}$  – цикловая подача на номинальном режиме, г;  $\rho_{\text{т}}$  – плотность топлива =  $830 \text{ кг/м}^3$ ;  $\tau$  – тактность.

Оценка наполнения ТНВД производилась по соотношениям, полученным в соответствии с изложенным в главе 2. Как видно из рис. 2а, к моменту начала сжатия топлива газосодержание равно нулю. Следовательно, наполнение плунжерной полости без искусственного дросселирования на всасывании – полное. На рис. 2б и 2г видно, что увеличение количества впускных отверстий во втулке плунжера приводит к снижению газосодержания в надплунжерной полости и, соответственно, к увеличению цикловой подачи.

Оптимальные значения давления впрыскивания были получены из соображений необходимости выполнения нормативов экологического класса 4 при обеспечении минимального расхода топлива и ограничении давления в цилиндре. Полученное поле оптимальных значений давления впрыскивания в поле режимов дизеля с применением программы МГТУ им. Н.Э.Баумана Дизель-РК представлено на рис. 2в.

Расчетное исследование форсунок СНВТ для двухтактного двигателя РМЗ-501 производилось с использованием методик расчёта гидромеханических форсунок.

Расход топлива клапанной форсунки:

$$Q = \mu_k \pi h_{и} \sin \frac{\alpha}{2} \left( d_1 - h_{и} \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right) \sqrt{\frac{2}{\rho} (p - p_z)}. \quad (16)$$

Для расчёта нормальной закрытой форсунки была разработана следующая методика.

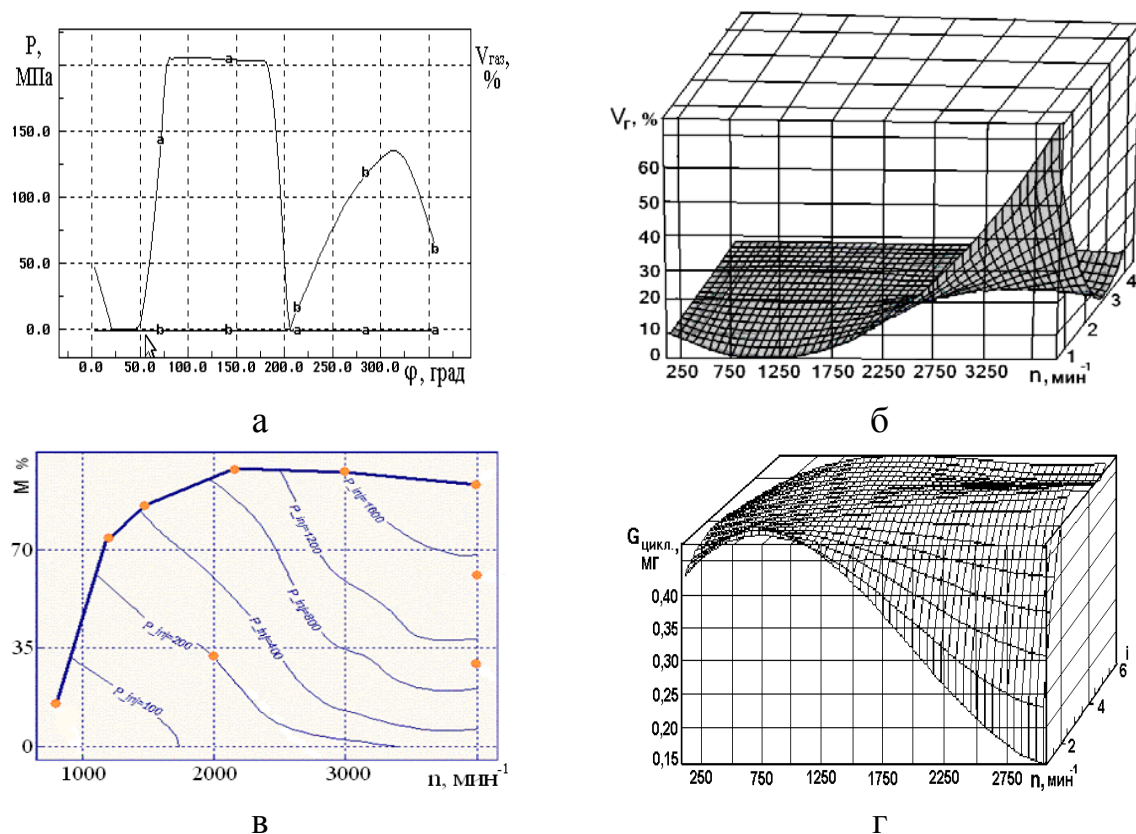


Рис. 2. Результаты расчетного исследования ТНВД CR: а - мгновенная величина давления и газосодержания в надплунжерной полости ТНВД CR в функции угла поворота приводного вала ТНВД; б - зависимость образования газовой фазы в плунжерной полости от частоты вращения вала ТНВД и числа наполнительных окон при диаметре окна 2 мм; в - оптимальные значения давления впрыскивания в поле режимов дизеля ЗМЗ-514.10; г - цикловая подача ТНВД в функции частоты вращения вала ТНВД и числа наполнительных окон при диаметре окна 2 мм

Расход топлива определяется в зависимости от скорости поступления топлива в цилиндр за цикл:

$$Q_{\max} = \left( \frac{dV_{\text{ц}}}{dt} \right)_{\max} = \frac{kV_{\text{ц}}}{\varphi_{\text{в}}} 6n . \quad (17)$$

Давление начала впрыскивания  $p_{\Phi 0}$  определяется и регулируется при впрыскивании в среду с атмосферным давлением  $p_0$ , поэтому условие равновесия иглы в момент её отрыва от седла для нормальной закрытой форсунки имеет следующий вид:

$$F_1 = p_{\Phi 0} \pi \frac{d_0^2 - d_1^2}{4} + p_0 \frac{\pi d_1^2}{4} , \quad (18)$$

где:  $F_1$  – сила предварительного сжатия пружины.

После окончания впрыскивания и посадки иглы на седло условие герметичности форсунки по седлу иглы можно записать следующим образом:

$$F_1 \geq p_{\Phi 0} \pi \frac{d_0^2 - d_1^2}{4} + p_z \frac{\pi d_1^2}{4} . \quad (19)$$

Из двух последних выражений можно определить соотношение диаметров иглы

$$\frac{d_0}{d_1} = \sqrt{\frac{p_z - p_0}{p_{\Phi 0} - p_{\text{ост}}} + 1} . \quad (20)$$

Классические шестеренчатые ТПН целесообразно заменять на более эффективные насосы героторного типа. Отсутствие удобного способа проектирования колес героторного насоса сдерживает их внедрения в производство. В диссертации описывается методика построения координат эвольвенты героторного ТПН. Текущие значения координат профиля зубьев шестерни определяются следующими уравнениями в параметрическом виде:

$$x_T = r(z+1)\cos\varphi - \lambda r \cos[(z+1)\varphi] - R \frac{\cos\varphi - \lambda \cos[(z+1)\varphi]}{\sqrt{1+\lambda^2 - 2\lambda \cos(z\varphi)}} , \quad (21)$$

$$y_T = r(z+1)\sin\varphi - \lambda r \sin[(z+1)\varphi] - R \frac{\sin\varphi - \lambda \sin[(z+1)\varphi]}{\sqrt{1+\lambda^2 - 2\lambda \cos(z\varphi)}} . \quad (22)$$

На рис. 3 представлена схема образования профиля зуба шестерни

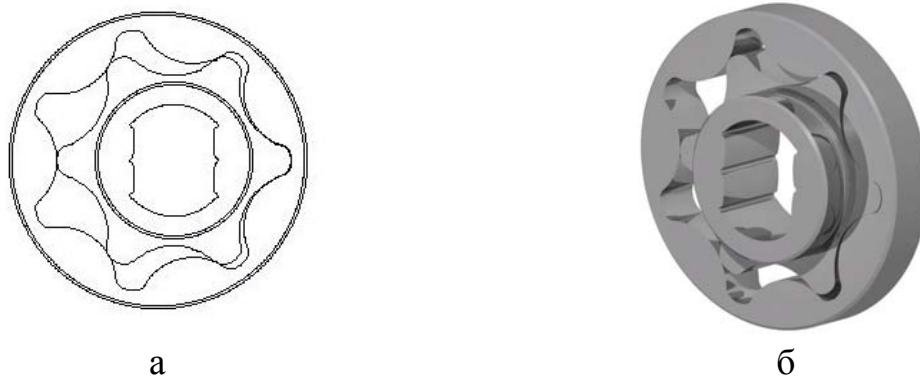


Рис. 3. Результат численной оптимизации ведущей шестерни и ведомого колеса подкачивающего насоса для СНВТ: а - рассчитанный профиль; б – спроектированные профили

В работе проведено расчетное исследование основных параметров СНВТ и возможностей использования различных технических решений, выполненное с использованием описанных математических моделей (рис. 4).

При расчетной оптимизации СНВТ в качестве режимных и конструктивных параметров системы рассматривались диаметр и длина нагнетательного трубопровода, мертвые объемы, диаметр и ход плунжера, давление начала впрыскивания, массы и хода иглы форсунки и др. (рис. 5).

Расчетная оптимизация СНВТ позволила сократить время подготовки опытных систем и вести их доработку.

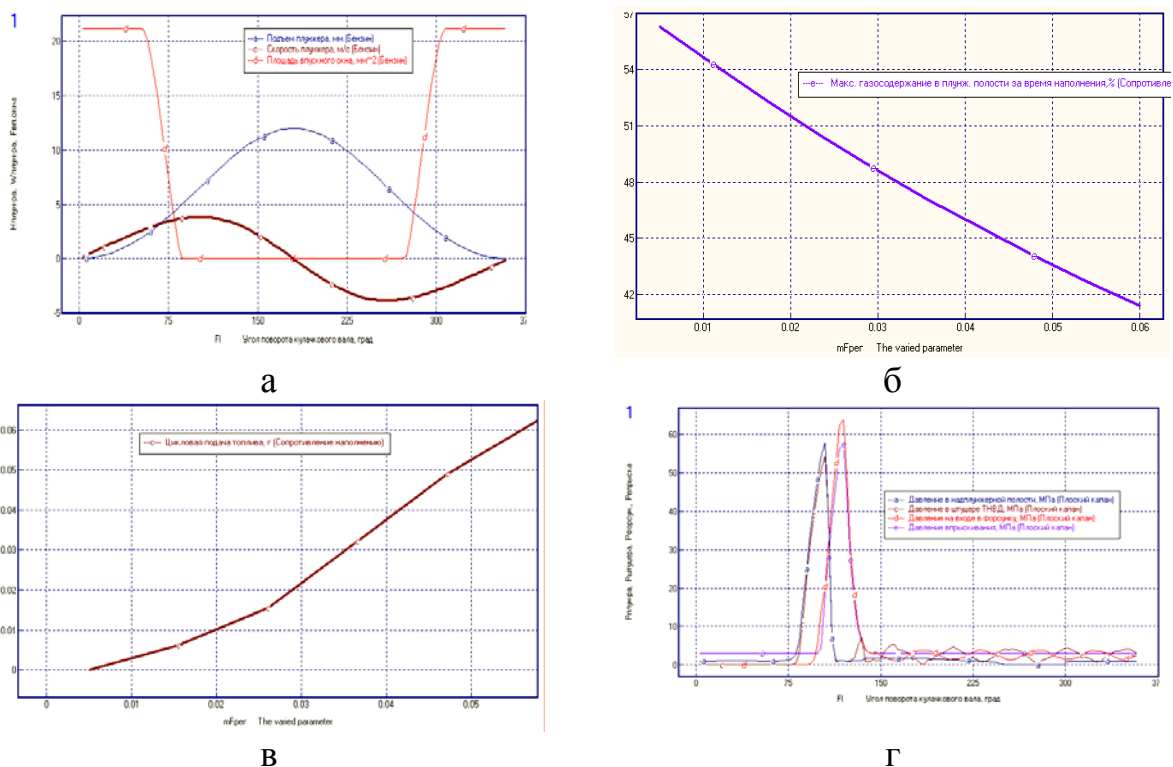


Рис. 4. К расчетному исследованию СНВТ: а – подъем и скорость плунжера, сечение впускных окон при частоте вала ТНВД  $6000 \text{ мин}^{-1}$ ; б – максимальное газосодержание в плунжерной полости в функции состояния регулирующего дросселя на всасывании; в - цикловая подача в функции состояния регулирующего дросселя на всасывании; г – давления в плунжерной полости, штуцере, в форсунке, впрыскивания при  $6000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{ц}=27 \text{ мг}$

Разрабатывались методы повышения надежности ТНВД СР. Необходимость в проведении таких работ диктовалась стремлением создания образца насоса для серийного производства. В частности, под технологическую линию литья ОАО «ДАЗ» произведена замена материала СЧ24 на АК12М2. Расчётом было установлено (рис. ба), что простая замена чугуна на алюминиевый сплав не даёт положительного результата.

Присоединительная поверхность корпуса к крышке насоса деформируется.

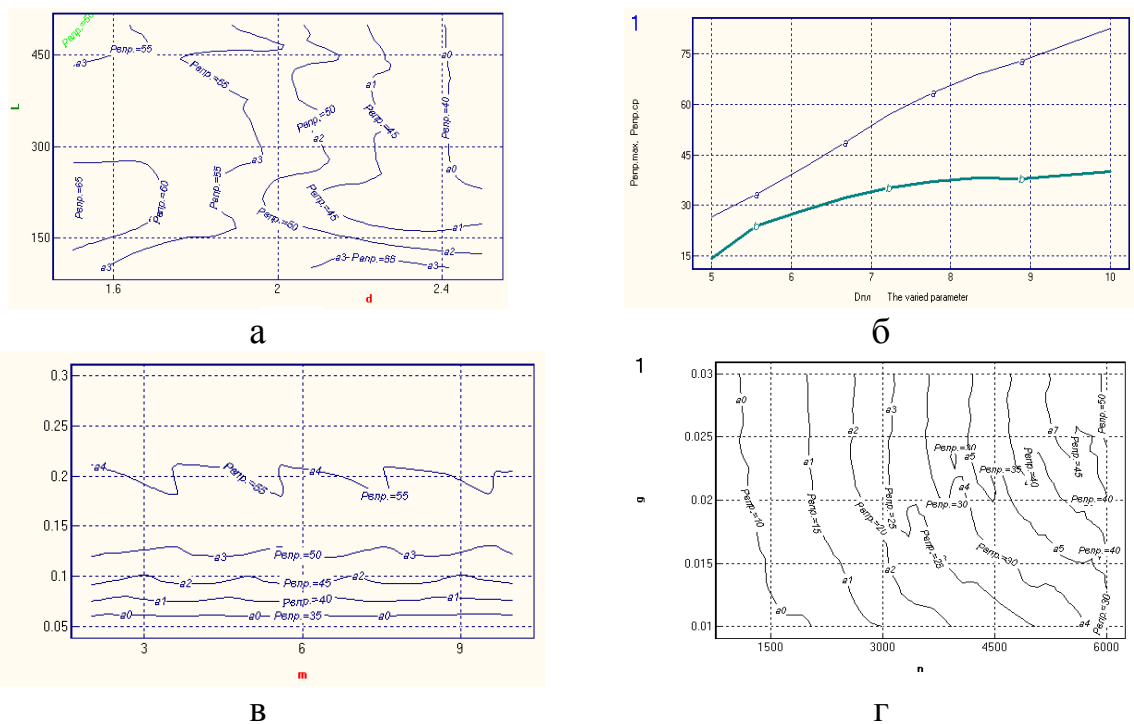


Рис. 5. Расчетная оптимизация СНВТ: а - зависимость максимального давления впрыскивания в функции длины и диаметра нагнетательного трубопровода.; б – давление впрыскивания при уменьшении мертвого объёма в надплунжерной полости; в – зависимость максимального давления впрыскивания от величин массы и хода иглы форсунки; г – зависимость максимального давления впрыскивания от цикловой подачи и частоты вала ТНВД

Для решения данной проблемы разработчиками МГТУ им. Н. Э. Баумана была предложена стальная проставка между корпусом ТНВД и его крышкой. Повторный анализ геометрии корпуса с проставкой подтвердил целесообразность этого решения. Переход от материала СЧ24 к АК12М2 стал возможным (рис. 6б).

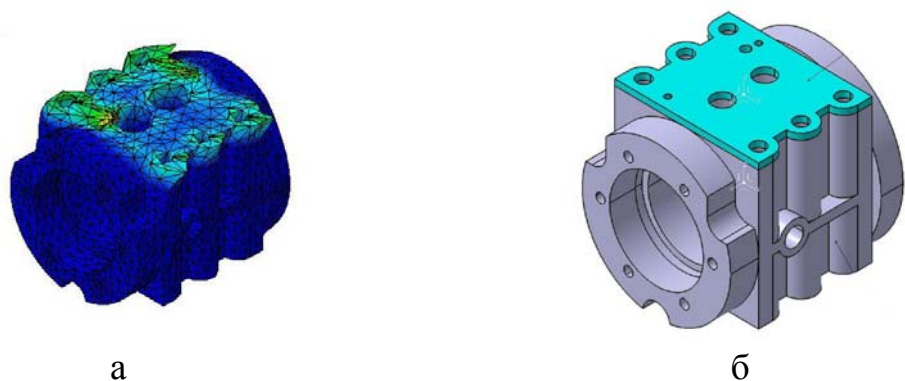


Рис. 6. Поиск технических решений для повышения надёжности ТНВД CR: а – прочностной анализ модели корпуса ТНВД из материала АК12М2; б – введение стальной проставки между корпусом ТНВД и его крышкой

Расчет рабочего процесса двигателя с СНВТ и традиционной системой питания в диссертации производился с использованием программы Дизель-РК. Результат расчета и оптимизации рабочего процесса двигателя РМЗ-501 с СНВТ показал, что в зоне основных эксплуатационных режимов работы и номинала наибольшее снижение расхода топлива составило 47%. Существенно (на 70-90%) снижаются выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Использование СНВТ позволяет на 10-15% повысить максимальную мощность двигателя за счет увеличения степени сжатия (табл. 1).

Таблица 1.

Результаты расчетного анализа показателей двигателя РМЗ-501 с карбюратором и СНВТ на номинальном режиме ( $n=6000$  1/мин)

	исходный с карбюратором	с СНВТ	с СНВТ после оптимизации степени сжатия и УОЗ
Мощность, [кВт]	19.439	20.020	21.829
Удельный эффективный расход топлива, [кг/(кВт·ч)]	0.48904	0.28439	0.26056
Крутящий момент, [Н·м]	31.076	31.865	33.152

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям опытных систем для непосредственного впрыскивания бензина и дизельных систем Common Rail.

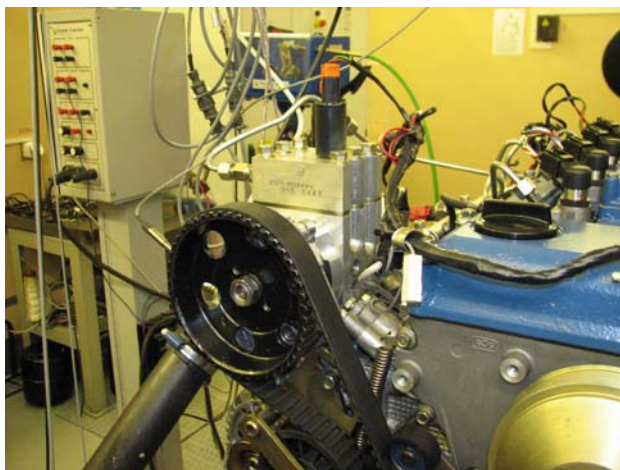
Испытания опытных образцов ТНВД CR проводились на безмоторном стенде в лаборатории МГТУ им. Н.Э. Баумана. Протекание гидравлической характеристики первого опытного насоса было типичным для поршневых насосов. Однако, большая крутизна падения кривых свидетельствовала о его недостаточном совершенстве, в частности, недостаточной гидроплотностью плунжерных пар. Тем не менее, скоростная характеристика позволила сделать вывод о совместимости ТНВД и дизеля, наметить пути совершенствования опытного ТНВД. В дальнейшем дефект был устранен.

Модернизированные варианты ТНВД позволили проводить испытания на дизеле, обеспечили возможность подачи под давлением от 160 до 200 МПа на частотах до  $3500 \text{ мин}^{-1}$  с обеспечением заданной производительности на всех рабочих режимах дизеля ЗМЗ-5148.10 с форсунками Siemens (с пьезоприводом клапана, максимальным давлением 160 МПа). При этом замечаний по состоянию ТНВД в процессе и после испытаний уже не отмечалось.

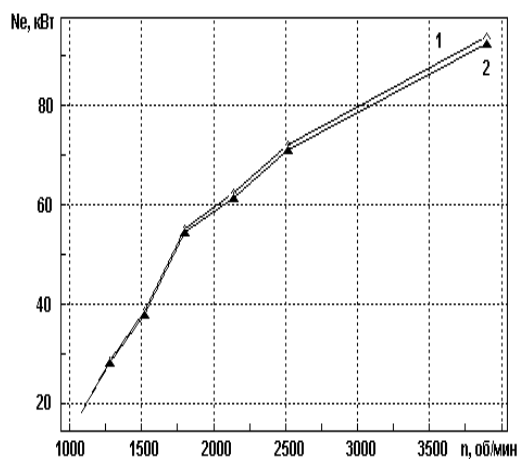
Довести испытания ТНВД, построенных в сотрудничестве ОАО «ДААЗ», ОАО «ЗМЗ», ОАО «РААЗ» и МГТУ им. Н.Э.Баумана, удалось в режиме полных энергетических и экологических испытаний на стендах ОАО «НИКТИД» (рис. 7). Испытания на дизеле ЗМЗ-5148.10 не выявили существенных отличий в экологических показателях при замене исходного ТНВД фирмы Siemens на опытный ТНВД.

Испытания элементов высоконапорной ТПА (форсунок) проводились согласно технического задания, в ОАО «ДААЗ» рис. 8.

Испытания подтвердили работоспособность спроектированных топливных форсунок и возможность их применения для систем непосредственного впрыскивания бензина.



а



б

Рис. 7. Моторные испытания ТНВД на дизеле ЗМЗ 5148.10: а - установка опытного ТНВД на дизель ЗМЗ-5148.10 на стенде ОАО НИКТИД; б – изменение мощности дизеля ЗМЗ-5148.10 при работе по внешней характеристике с штатным ТНВД фирмы Siemens (1) и опытным ТНВД (2)



Рис. 8. Развитие топливной струи клапанной форсунки

Испытания СНВТ, предназначенной для двигателей РМЗ-501 и РМЗ-550, производились в ОАО «Русская механика» (рис. 9).

После испытаний СНВТ первого поколения (рис.9а) была существенно переработана конструкция основных элементов системы.

Глубокой доработки подвергся ТНВД рис. 9б. В конструкцию был введен ТПН героторного типа, обеспечивающий требуемую производительность и давление подачи масла. На рис. 9в представлены безмоторные испытания СНВТ, подтвердившие расчетную расходную характеристику и давление впрыскивания топлива. Доработанная СНВТ после установки на двигатель РМЗ-550 позволила выйти на номинальный режим работы двигателя рис. 9г.



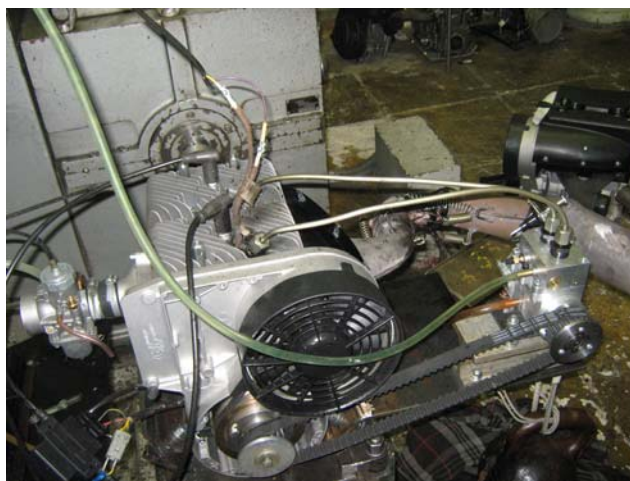
а



б



в



г

Рис. 9. Испытания СНВТ: а – установка ТНВД на лабораторном двигателе; б – доработанный ТНВД; в – испытания на безмоторном топливном стенде; г – моторные испытания

## ВЫВОДЫ

1. Математическая модель топливоподачи с уточненным расчетом упругих свойств легких топлив и газотопливных смесей, наполнения плунжерной полости с описанием динамики двухфазного состояния, утечек в прецизионном уплотнении позволила более достоверно проводить гидродинамические расчеты для задач проектирования и оптимизации аппаратуры при подаче маловязких легкокипящих топлив и в ТНВД аккумуляторных систем.

2. Для топливных систем с впрыскиванием топлива в цилиндр мало-размерного двигателя применимы простые схемы с пневмомеханическим управлением с использованием разрежения во впускном тракте и дросселирования топлива на всасывании в насосную секцию плунжерного ТНВД.



3. Разработанные методики проектирования и оптимизации гидромеханических и электромеханических форсунок ускоряют процесс изготовления, апробации и доводки ТПА.

4. Разработанные методы проектирования энергоэффективного шестерёнчатого насоса с внутренним зацеплением героторного типа для СНВТ позволяют выбирать основные технические решения и параметры такого ТПН.

5. Разработанные теоретические основы проектирования ТНВД для дизельных и бензиновых двигателей позволяют определить основные размеры насоса, проводить его оптимизацию, обеспечить работоспособность насоса при высоких давлениях подачи, обеспечить его функционирование с учетом ограничительных параметров и выявлять наиболее трудные для проектирования моменты, и дают рекомендации по их решению.

6. Наличие общих компонентов, общая методология математического описания, опыт конструирования, общность ряда подходов к проектированию насосов и, наконец, наличие общей технологической базы ОАО «ДААЗ» для их производства обусловило целесообразность разработки ТНВД как для СНВТ, так и для наиболее перспективной для дизельной топливной системы типа CR.

7. Стендовые испытания опытных ТНВД показали перспективность основных заложенных технических решений. Обеспечена работоспособность ТНВД дизеля на частотах до  $3000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P = 200 \text{ МПа}$  и в составе СНВТ на частотах до  $8500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P = 20 \text{ МПа}$  при смазывании привода плунжеров дизельным топливом или маслом. ТНВД такого типа – высокотехнологичный продукт, требующий высокого качества изготовления.

8. ТНВД для Common Rail дизеля ЗМЗ-5148.10 обеспечил необходимые давления и подачи в поле рабочих режимов и сохранение экономических и экологических показателей дизеля по экологическому классу 4 при импортозамещении насоса фирмы Siemens.

9. Испытания опытной СНВТ и ее компонентов показали применимость разработанных теоретических основ их проектирования и основных технических решений.

10. Созданные компоненты высоконапорной ТПА могут рассматриваться как прототипы новой серийной продукции для отечественных бензиновых и дизельных двигателей.

11. Замена карбюратора на СНВТ обуславливает повышение мощности двигателя двухтактного бензинового двигателя на 13%, снижение расхода топлива на номинальном режиме на 47%.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В НАУЧНЫХ РАБОТАХ (в соответствии с рекомендуемым перечнем ВАК РФ – п.5):

1. Топливные насосы высокого давления для аккумуляторных систем типа Common-Rail / Л.В. Грехов [и др.] // Межд. симпозиум «Образование

через науку»: Материалы докл. секции «Двигатели внутреннего сгорания». Москва, 2005. С.20-22.

2. Разработка специализированного ТНВД для системы Common Rail / Л.В. Грехов [и др.] // Сб. научн. трудов по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 113-118.

3. Грехов Л.В., Потапов А.И. Топливный насос высокого давления для системы COMMON – RAIL // Сб. научн. трудов по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 233-236.

4. Разработка специализированного ТНВД для системы Common Rail / Н.Е. Борисенко [и др.] // Материалы 10-го Всероссийского слета...лауреатов конкурса Министерства образования и науки РФ и Государственного фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «Ползуновские гранты» // Под. общ. ред. А.А. Максименко. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. С. 7-13.

5. Потапов А.И., Грехов Л.В., Малкин А.В. Разработка системы непосредственного впрыскивания бензина для малоразмерного отечественного двигателя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Машиностроение. Специальный выпуск «Двигатели внутреннего сгорания». Москва, 2007. С. 95-102.

6. Теория и практика проектирования топливного насоса высокого давления для системы Common-Rail / Л.В. Грехов [и др.] // Сб. научн. трудов по матер. Межд. конф. Двигатель-2007, посв. 100-летию школы двигател. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 284-289.

7. Расчет быстропротекающего электромагнитного процесса в приводе клапана дизельной системы с электронным управлением / Л.В. Грехов [и др.] // Сб. научн. трудов по матер. Межд. конф. Двигатель-2007, посв. 100-летию школы двигател. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 289-293.

8. Грехов Л.В., Потапов А.И. Топливная аппаратура для непосредственного впрыскивания бензина в двухтактный двигатель // Сб. научн. трудов Межд. конф. Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана // Под редакцией Н.А. Иващенко, В.А.Вагнера, Л.В. Грехова. М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 322-325.

9. Потапов А.И., Грехов Л.В. Создание топливоподающей аппаратуры для двухтактного двигателя с непосредственным впрыскиванием бензина // Матер. XII Межд. научн.-практ. конф. Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей // Под общ. ред. А.Н. Гоца. Владимир, 2010. С. 128-133.

10. Пат. 2285145 РФ, МПК F 02 M 51/06, F 16 K 31/02. Электромагнитный дозирующий клапан/ Потапов А.И.; Заявл. 11.01.2005 г.; Оpubл. 10.10.2006 г. – 3с.