

на правах  
рукописи

Рыжов Валерий Александрович

Совершенствование характеристик форсированных  
среднеоборотных двигателей двойного назначения  
средствами топливоподачи и воздухоснабжения

Специальность 05.04.02 – «тепловые двигатели»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Москва 2018

Работа выполнена в ОАО Холдинговая Компания «Коломенский завод»

Официальные оппоненты: **Гаврилов Владимир Васильевич**

доктор технических наук, профессор кафедры  
«Теория и конструкция судовых ДВС» ФГБОУ ВО  
Государственный университет морского и речного  
флота имени адмирала С.О. Макарова

**Коссов Евгений Евгеньевич**

доктор технических наук, профессор, главный  
научный сотрудник АО «Научно-исследовательский  
институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ)

**Шатров Михаил Георгиевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой «Теплофизика и автотракторные  
двигатели» ФГ БОУ ВО «Московский автомобильно-  
дорожный государственный университет» (МАДИ)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»

Защита состоится « 09 » октября 2018г. в 14 час. на заседании  
диссертационного совета Д212.141.09 при МГТУ 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  
и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,  
просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская  
ул., д. 5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного  
совета Д212.141.09.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_ » 2018г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, кандидат технических наук,  
доцент

Тумашев Р.З.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность проблемы**

Специфика создания двигателей двойного назначения заключается в том, что при проектировании типоразмерного ряда головной образец создается по наиболее жестким требованиям, сформулированным путем прогноза развития силовых установок по уровню форсирования, ресурсных, экологических и весогабаритных показателей. Таким образом, при создании агрегатов различного назначения силовая база двигателя остается постоянной, а необходимые характеристики обеспечиваются путем комбинации систем воздухоснабжения, топливной аппаратуры и ряда внешних периферийных узлов, обеспечивая вариативность типоразмерного ряда. Такой подход существенно сокращает сроки создания установок на базе двигателя, позволяет существенно повысить качество проектирования и изготовления. Существенно возросшие требования таких базовых отраслей, как железнодорожный транспорт, военно-морской флот и атомная энергетика к дизельным энергетическим установкам, а также поставленные правительством Российской Федерации задачи в ряде Государственных программ по созданию в кратчайшие сроки дизельных установок нового поколения требуют от конструкторов и производства четких оперативных решений выполненных в возможно короткие сроки и с высоким качеством проектов. В указанных базовых отраслях наиболее востребованы дизельные установки в мощностном диапазоне от 3300 до 7500 кВт. В связи с этим разработка методов и средств совершенствования топливоподачи и воздухоснабжения, позволяющих конструктору относительно быстро и с высоким качеством реализовать требуемые характеристики двигателей с учетом специфических заданных требований, является актуальной задачей.

**Цель работы:** совершенствование характеристик форсированных двигателей двойного назначения средствами топливоподачи и воздухоснабжения с целью улучшения показателей экономичности, токсичности отработавших газов и повышения уровня форсировки.

**Объект исследования:** комплекс методов и средств совершенствования систем топливоподачи и воздухоснабжения, обеспечивающих улучшение характеристик и вариативность среднеоборотных двигателей двойного назначения ряда Д49 (ЧН26/26) и головных образцов новых типоразмерных рядов Д300 (ЧН26/28) и Д500 (ЧН26,5/31).

**Методы исследований:** в работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. В ходе теоретических исследований использованы современные положения теорий рабочих процессов, гидродинамики, газодинамики, прочности и электротехники. Для решения уравнений, описывающих процессы в системах топливопадачи, воздухоснабжения и напряженно-деформированное состояние базовых деталей, использованы современные численные методы. Результаты теоретических исследований сопоставляли с результатами, полученными в ходе безмоторных и моторных испытаний систем и двигателей и опубликованными материалами других авторов.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Разработана методология создания современного форсированного среднеоборотного двигателя двойного назначения с учетом достигнутого уровня технологий, проектирования и производства сложной наукоемкой продукции энергомашиностроения.

2. Разработаны и реализованы методики выбора основных параметров системы топливоподачи, обеспечивающие получение оптимальных характеристик впрыска, высокие экологические и экономические параметры среднеоборотного форсированного двигателя.

3. Разработаны и экспериментально проверены различные варианты систем турбонаддува, в том числе с реализацией цикла Миллера применительно к высокофорсированным среднеоборотным двигателям двойного назначения.

4. Разработаны и экспериментально проверены способы обеспечения предельно возможных ограничительных характеристик высокофорсированных среднеоборотных двигателей главных силовых установок кораблей нового поколения классов «Корвет» и «Фрегат» проектов 20380 и 22350.

**Достоверность и обоснованность научных положений** определяются:

- использованием современных математических моделей, в основе которых положены фундаментальные законы термодинамики, гидродинамики, газодинамики и прочности;
- сопоставлением результатов расчетных и экспериментальных исследований, выполненных в процессе создания опытных двигателей;
- использованием разработанных методов и средств при создании двигателей нового поколения 12ЛДГ Д300 и 12ЛДГ500, а также новых модификаций двигателей 21-26ДГ-01, 18-9ДГ-01, 10Д49 и 16Д49 типоразмерного ряда Д49.

**Практическая ценность** состоит в том, что:

- разработанные методы и средства конструирования включены в систему автоматизированного проектирования КБ ОАО «Коломенский завод»;
- использование встроенных в системный ряд методик расчетов и алгоритмов проектирования позволило повысить качество проектов, сократить сро-

ки проектирования и доводки модификаций двигателей в 2–3 раза, что существенно сокращает затраты при их постановке на производство;

- разработанные конструкторско-технологические мероприятия позволили улучшить характеристики ряда двигателей Д49 и головных образцов новых рядов Д300 и Д500 и используются в перспективном проектировании.

**Реализация результатов работы.** С использованием разработанных методов и средств создан полноразмерный двигатель специального назначения 22ДГМ (8ЧН26/26) с аккумуляторной системой топливоподачи и электронным управлением.

Впервые в мире был создан газодизельный двигатель (16ЧН26/26) для тепловоза 2ТЭ116Г, прошедшего успешные испытания. Тепловоз демонстрирован на международной выставке.

Внедрение разработанной автором системы топливоподачи с трехфазным впрыском для дизеля Д49М (12ЧН26/26) позволило обеспечить лучшие в Европе (по состоянию норм 2001г.) экономические и экологические показатели в классе тепловозных дизелей. В итоге ОАО «Коломенский завод» выиграл тендер на поставку 86 дизель-генераторов для железных дорог Германии. Затем в Польшу и Прибалтику.

По Государственному оборонному заказу создан уникальный дизель – дизельный комплекс общей мощностью 17680 кВт в качестве главной силовой установки нового боевого корабля класса «Корвет» проекта 20380. На дизелях 16Д49 (16ЧН26/26) этой установки впервые в России использована разработанная и представленная в настоящей работе регистровая система турбонаддува с электронным управлением, а также ряд новых технических решений в области топливной аппаратуры. Этот проект удостоен Премии правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Впервые в России был поставлен на производство дизель-генератор 21-26ДГ-01 с разработанной автором системой топливоподачи импульсного действия для первого в России тепловоза 2ТЭ25А с передачей переменно–переменного тока. В настоящее время около 150 тепловозов эксплуатируются на Дальнем Востоке и в Сибири.

С использованием разработанных методологий и конструкций впервые в России созданы, построены и испытаны головные образцы двух новых типо-размерных рядов Д300 (ЧН26/28) и Д500 (12ЧН26,5/31) мощностью до 7500 кВт. Работы выполнены в ходе выполнения Государственной программы «Национальная технологическая база».

С использованием системы автоматизированного проектирования в основе которой положена систематизированная иерархия моделей и методов, а также конструкторские решения, предложенные автором, спроектированы и

поставлены на производство дизель-генераторные установки 15-9ДГ для атомных станций «Бушер» и «Белоярская», силовые установки 28ДГ и 2-28ДГ для подводных лодок проектов 667 «Лада» и 955А «Борей», большого десантного корабля «Иван Грен» (проект 11711), кораблей нового поколения класса «Корвет» (проект 20380) и фрегата «Адмирал Кузнецов» (проект 22350), пограничных кораблей проектов 22160 и 22100, дизель-генераторной установки АДГ2000 для военно-космических сил России.

**Личный вклад автора.** Проведен аналитический обзор основных направлений совершенствования форсированных среднеоборотных двигателей двойного назначения. Сформулировано определение термина двигатель двойного назначения. Выполнен анализ и синтез особенностей методологии конструирования среднеоборотных двигателей двойного назначения в современных условиях. Разработаны инженерные методики расчета и особенности конструирования топливных систем для традиционных и альтернативных топлив. Разработаны исследованы и внедрены конструкторско-технологические мероприятия улучшающие характеристики систем питания и двигателя. Выполнены аналитические исследования возможностей систем воздухоснабжения различных типов и в составе творческой группы проведены их экспериментальные исследования на полноразмерных двигателях 21-26ДГ-01, 19-9ДГ, 26ДГ №7, 10Д49, 16Д49, 28ДГ, 15ДГУ, 2-28ДГ для локомотивов, кораблей и подводных лодок ВМФ, атомных станций и малой энергетики для спецобъектов. Разработана принципиальная схема управляемой регистровой системы воздухоснабжения для главных судовых двигателей кораблей нового поколения проектов 20380 (корвет) и 22350 (фрегат). Система испытана и внедрена на двигателях 10Д49 и 16Д49. Разработана принципиальная схема двухступенчатой системы воздухоснабжения с промежуточным охлаждением, состоящей из двух регулируемых турбокомпрессоров первой ступени и одного второй ступени обеспечивающей реализацию рабочего процесса с циклом Миллера с эмиссией вредных веществ в отработавших газах по нормам STAGE 3A ES2003/26EG. Раскрыты особенности конструирования среднеоборотных форсированных двигателей двойного назначения с учетом предложенных по результатам исследований мероприятий совершенствования топливоподачи и воздухоснабжения.

**На защиту выносится:** совокупность разработанных автором методов и средств совершенствования систем топливоподачи и воздухоснабжения, обеспечивающих расширение границ применения двигателей двойного назначения типоразмерного ряда Д49, головных образцов 12ЛДГ300 и 12ЛДГ500 новых типоразмерных рядов, улучшение их экономических и экологически показателей, приемистости и пусковых свойств.

**Апробация работы** Основные положения работы обсуждены:

- на заседании кафедры Поршневые двигатели МГТУ им. Н.Э. Баумана, (Москва, 2017г);
- на Всемирном конгрессе CIMAC, (Хельсинки, 2016г);
- на Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению», институт машиноведения им. А.А. Благонравова, (Москва, 2014г);
- на Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики», (С.Петербург, 2012г);
- на международной конференции «Двигатель – 2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана, (Москва, 2010г);
- на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы поршневых ДВС», посвященной 120-летию В.А. Ваншейдта, (С.Петербург, 2010г);
- на Всероссийской научно-технической конференции «Развитие двигателестроения России», (С.Петербург, 2009г);
- на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы поршневых ДВС», (С.Петербург, 2008г);
- на Всероссийской научно-технической конференции «Машиноведение и детали машин», (Москва, 2008г);
- на Международной конференции «Железнодорожное машиностроение. Перспективы, технологии, приоритеты», (Москва, 2007г);
- на Международной конференции «Двигатель – 2007», посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э.Баумана, (Москва, 2007г);
- на Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры судовых ДВС и дизельных установок Ленинградского кораблестроительного института, (С.Петербург, 2005г);
- на Международном VI конгрессе двигателестроителей, (Харьков, 2001г);
- на Международной научно-технической конференции «Двигатель – 97», посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э.Баумана, (Москва, 1997г);
- на Международной научно конференции «Двигатели внутреннего сгорания», (Варна, Болгария, 1989) и др.

**Публикации.** По теме диссертации изданы:

Книга и раздел энциклопедии «Машиностроение» том № 14 (в соавторстве), опубликованы 147 научных трудов. В том числе 60 в журналах, включенных в перечень ВАК РФ, 7 работ на правах рукописи, 5 учебно-методических работ. Получено 43 патента на изобретения. Опубликовано 15 материалов научно-технических конференций. Общий объем основных работ - 39,4 п.л., представленных в реферате - 4,44 п.л..

## **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов по диссертационной работе, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 317 стр. основного текста, включающего 128 рисунков, 35 таблиц. Список использованной литературы включает 125 наименований. Приложение на 10 страницах содержит перечень разработанных с использованием материалов диссертации и патентов дизельных установок, поставленных на производство с 2001 по 2017 год, а так же акты о внедрении материалов диссертации в практику проектирования КБ «Коломенского завода».

## **Содержание работы**

**Во введении** сформулировано определение понятия двигателя двойного назначения как силового агрегата созданного на базе унифицированных силовых моделей дизелей типоразмерного ряда, удовлетворяющего требованиям как гражданских, так и военных объектов. Сформулирована специфика создания двигателей двойного назначения.

**В первой главе** диссертации выполнен анализ основных направлений развития форсированных среднеоборотных дизелей, определены наиболее эффективные пути улучшения их характеристик за счет новых технических решений в областях топливной аппаратуры, систем воздухоснабжения, смазки и способов организации рабочего процесса. Предложены прогнозные показатели среднеоборотного двигателя двойного назначения с учетом внедрения новых разработок. Анализ выполнен на базе собственного опыта проектирования и доводки среднеоборотных двигателей двойного назначения с учетом материалов известных ученых: Балашова А.А.; Буханько А.А.; Гаврилова В.В.; Галышева Ю.В.; Грехова Л.В.; Данилова А.М.; Еникеева Р.Д.; Исаева А.В.; Корнеева Н.В.; Кузнецова А.Г.; Кулешова С.А.; Маркова В.А.; Онищенко Д.О.; Резникова В.Д.; Фурмана В.В.; Цветкова О.Н.; Чайнова Н.Д. и др., а также материалов конгрессов СИМАС. На основании проведенного анализа сформулированы задачи исследования.

1. Выделить особенности методологии конструирования среднеоборотных дизелей двойного назначения в современных условиях с учетом комплексного использования ЭВМ при разработке проектов и постановке новых конструкций на производство.

2. Уточнить алгоритмы построения комплексного расчета двигателя и цикла проектных работ по созданию двигателя.

3. Разработать инженерную методику выбора основных параметров элементов систем питания.

4. Разработать конструкторско-технологические мероприятия обеспечивающие расширение возможностей систем питания и характеристик двигателей с учетом использования альтернативных топлив.

5. Выполнить анализ систем турбонаддува применительно к среднеоборотному двигателю двойного назначения с рекомендациями их использования в зависимости от функционального назначения дизельной установки.

6. На базе выполненных расчетов разработать вариант системы турбонаддува в наибольшей степени отвечающей современным требованиям к внешним характеристикам судового двигателя специального назначения.

7. Раскрыть особенности моделирования и выбора параметров двухступенчатой системы турбонаддува с целью поиска компромиссного решения по организации рабочего процесса в наибольшей степени удовлетворяющего требованиям обеспечения экологических и экономических показателей головных образцов новых типоразмерных рядов Д300 и Д500. Выбрать параметры и основные узлы систем с виртуальным отображением на двигателе.

8. Выполнить анализ иерархической системы моделей для оценки прочности деталей двигателя и разработать методику оценки прочностной надежности теплонапряженных деталей по критерию долговечности.

9. Раскрыть особенности конструирования среднеоборотных двигателей двойного назначения с учетом разработанных методов и средств совершенствования систем топливоподачи и воздухоснабжения.

**Во второй главе** изложены особенности обобщенной методологии конструирования среднеоборотных двигателей двойного назначения положенные в основу САПР конструкторского бюро ОАО «Коломенский завод».

Представлены предложенные автором структурные схемы комплексного использования ЭВМ при разработке и постановке на производство дизелей и цикла (Рис.1) проектных работ по созданию двигателей ОАО «Коломенский завод».

Развитие цифровой вычислительной техники и специальных разделов математической физики, особенно за последние 10 лет, позволило создать ряд развитых комбинированных программных комплексов на основе новых уточненных моделей процессов в системах двигателей, что существенно расширило границы виртуального представления этих процессов, повысило точность, а, следовательно, и достоверность вычислений, значительно ускорив сроки проектирования с использованием методов оптимизации.



Рис. 1. Структурная схема цикла проектных работ по созданию двигателя.

По мере совершенствования приемов конструирования, изготовления, испытаний, изучения условий эксплуатации, потребностей рынка были созданы и способы обеспечения менеджмента качества проектирования, представляющие собой совокупность последовательных взаимосвязанных параллельно-последовательных шагов от начала проектирования до постановки на производство.

Необходимое качество проектирования обеспечивается следующими оперативными действиями конструктора: организационное планирование; мониторинг рынка дизельной продукции; ориентация на потребителя; анализ основных направлений развития мирового дизелестроения; структурный и параметрический синтез конструкции; итерационное параллельно-последовательное проектирование; детерминированная верификация конструкции; использование информационного; методического, лингвистического, программного, математического и технического компонентов САПР.

Необходимыми условиями целостного выполнения проекта являются: наличие сильной конструкторской школы и кадрового потенциала; достаточный уровень программных и аппаратных средств; научно-технический задел; хорошо оснащенная экспериментальная база; минимально необходимый объем инвестиций и минимально возможные риски. Несмотря на мощные вычислительные ресурсы, применяемые расчетные программные комплексы, практически являющиеся универсальными инструментами, не могут обеспечить весь объем моделирования процессов и систем двигателя из-за специфических граничных условий этих процессов, что вызывает необходимость разработки специализированных удобных для конструктора программ, позволяющих обеспечить приемлемую точность результатов вычислений. Конкретная комбинация программных средств зависит от традиций конструкторской школы и постоянных заказчиков двигателей, что обусловлено требованиями совместимости виртуальных моделей двигателя и объекта, на котором он установлен.

Выбор размерности двигателя осуществляется на основе аналитических исследований в рамках наложенных ограничений с учетом приведенной в работе критериальной оценки проектируемого двигателя и конкурирующих с ним аналогов.

**В третьей главе** на основе анализа и синтеза методик известных авторов и собственного опыта конструирования представлены выстроенные в виде удобной для конструктора последовательности шагов инженерные расчеты системы топливоподачи от начала выбора исходных параметров ее основных базовых элементов и последующего гидродинамического моделирования до реального создания конструкции с учетом новых разработанных и исследованных конструкторско-технологических решений.

На первом этапе предложена методика предварительного расчета параметров базовых элементов магистралей низкого и высоко давлений (диаметры топливопроводов, производительности насосов, фильтры, геометрические размеры деталей топливного насоса высокого давления (ТНВД) и форсунок), реализованная в математическом редакторе Mathcad. Результаты этого расчета весьма важны для начала эскизных проработок конструкции, поскольку при проектировании головного образца нового типоразмерного ряда параметры

аналогов, как правило, неизвестны. Программа позволяет оценить в первом приближении прочность основных деталей.

В качестве исходных данных для предварительной оценки конструкции элементов форсунки, ТНВД и его привода предложены эмпирические зависимости давления впрыскивания и диаметра распыливающих отверстий от уровня форсирования двигателя:

$$P_v = 36,3 \cdot e^{0,625} \cdot P_{me} \quad (1)$$

где  $P_v$  – давление перед распыляющими отверстиями;  
 $P_{me}$  – среднее эффективное давление.

$$d_c = 3,92 \cdot l_\phi \cdot \left( \frac{U_c \cdot \tau_{il} \cdot 10^{-3}}{l_\phi} \right)^{-0,952} \left( \frac{\rho_\tau \cdot 10^3}{75 \cdot \rho_v} \right)^{-0,952} \left( \frac{U_c \cdot \rho_\tau \cdot 10^3}{\delta} \cdot l_\phi \right)^{-0,2} \left( \frac{\eta}{\rho_\tau \cdot 10^3 \cdot l_\phi \cdot \delta} \right)^{-0,152} \quad (2)$$

где  $d_c$  – диаметр распыливающего отверстия;  
 $l_\phi$  – длина топливного факела за период задержки воспламенения равная радиусу камеры сгорания;  
 $U_c$  – скорость истечения топлива;  
 $\tau_{il}$  – период задержки воспламенения;  
 $\rho_\tau, \rho_v$  – плотности топлива и воздушного заряда;  
 $\delta$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива;  
 $\eta$  – динамическая вязкость топлива.

Второй этап предполагает параметрическую оптимизацию параметров системы на базе гидродинамической модели Ю.Я.Фомина, в которую были внесены следующие уточнения и дополнения.

1. Программа дополнена подпрограммой расчета профиля топливного кулака по заданному закону перемещения плунжера.
2. Программа дополнена подпрограммой расчета всех силовых факторов, действующих на плунжер и его привод.
3. Программа дополнена подпрограммой расчета интегральной и дифференциальной характеристик впрыска для реализации связи с комплексом моделирования рабочего процесса дизеля.
4. Расчет проходного сечения под иглой по вновь разработанной методике с учетом перемещения минимального сечения по мере подъема силы.

Методика позволяет вычислить не только величину сечения, но и его положение, поэтому она была принята в настоящей работе. Согласно этой методике проходное сечение под конусом иглы определяется по формуле:

$$f_u = \pi \cdot l \cdot \sqrt{1+t^2} \left[ \left( d_{cg} - l \cdot \cos\left(\frac{\tau_1}{2}\right) \right) - l \cdot t \cdot \sin\left(\frac{\tau_1}{2}\right) \right] \quad (3)$$

где  $t$  и  $l$  – геометрические функции, зависящие от величины подъема иглы и углов конусного сопряжения.

При вычислении сил, действующих на иглу за границу раздела между камерой распылителя и распылительным каналом принято сечение с минимальной площадью под конусом иглы. Расчет проводится на заданную величину цикловой подачи.

Уточненный программный комплекс реализован в среде программирования Borland Delphi с именем Gidrodin1.06.

В системах с управляющим электромагнитным клапаном электромагнитную силу, действующую на клапан, с достаточной для практики конструирования точностью можно вычислить по упрощенной модели

$$\left. \begin{aligned} F_k &= \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S_b \cdot \gamma} \\ \frac{d\Phi}{dt} &= - \frac{r_o}{W \left( 1 + \frac{r_o}{r_n} \right)} \left[ \frac{l_b}{\mu_o \cdot S_b \cdot W} + \sum \frac{l_{ctk}}{\mu_{ctk} \cdot S_{ctk} \cdot W} \right] \cdot \Phi \cdot \frac{U}{W \left( 1 + \frac{r_o}{r_n} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток в катушке клапана;

$W$  – число витков катушки магнита;  $\mu_0$ ;

$\mu_o$ ,  $\mu_{ctk}$  – магнитная проницаемость вакуума и стального магнитопровода на участке  $S_{ctk}$ ;

$S_b$ ;  $S_{ctk}$  – площадь поперечного сечения воздушного и стального магнитопровода;

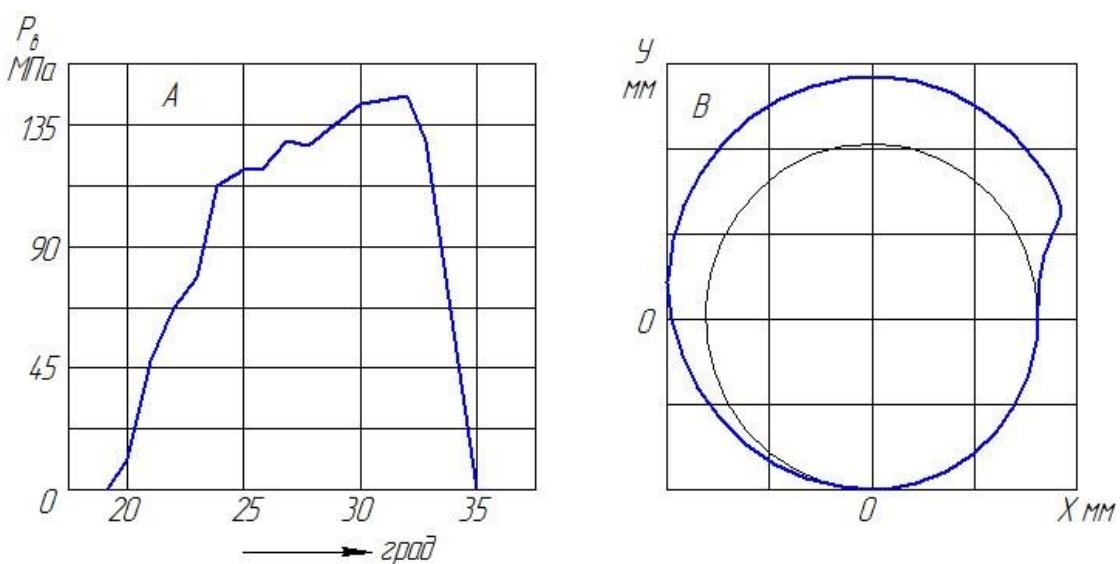
$r_0$ ;  $r_n$  – сопротивление катушки и внутреннее сопротивление генератора, сопротивление потерь в стали;

$U$  – напряжение на клеммах катушки;

$l_b$ ;  $l_{ctk}$  – длина пути магнитного потока в катушке и на участке стального магнитопровода.

Для моделирования процесса подачи аккумуляторной системой питания разработана методика, учитывающая отрицательный гидравлический удар, оказывающий значительное воздействие на формирование переднего фронта импульса давления впрыска, что весьма важно при оптимизации рабочего процесса двигателя по экономическим и экологическим показателям.

Примеры результатов моделирования процесса подачи топлива двигателя 21-26ДГ-01 (12ЧН26/26) на режиме 2500 кВт и  $1000 \text{ мин}^{-1}$  представлены на Рис. 2.



А – давление перед распыливающими отверстиями;  
В – профиль кулачковой шайбы.

Рис. 2. Результаты моделирования.

На третьем этапе выполняется оптимизация характеристик впрыска с использованием комплекса моделирования рабочего процесса «Дизель РК» МГТУ им. Н.Э. Баумана, поскольку он наиболее удобен для конструктора.

Вторая и третья части третьей главы посвящены разработке и исследованию конструкторско-технологических решений обеспечивающих улучшение качества подачи топлива и надежности топливной аппаратуры (ТА) при повышении давления впрыскивания до (150-180) МПа при форсировании двигателя и оптимизации его характеристик. Исследована работа ТА и дизеля 1-26ДГ (12ЧН26/26) мощностью 2500 кВт с одно, двух и трехфазным впрыском на дизельном топливе, водотопливной эмульсии (ВТЭ) и биотопливе. Для получения ВТЭ впервые использован генератор эмульсий с электронным управлением позволивший исключить эмульгаторы за счет автоматического смешивания топлива и воды непосредственно перед ТНВД. Установлено влияние скругления входных кромок распыливающих отверстий на формирование топливных факелов и рабочий процесс, предложена зависимость минимально-необходимого радиуса от диаметра отверстия  $r = (0,125-0,25) \cdot d$ . Необходимый радиус скругления обеспечен отработкой электрохимического процесса обработки внутреннего канала сопла. Увеличение запаса циклической прочности распылителей в два раза достигнуто с помощью экструзионного хонингования внутренней полости. За счет стабилизации остаточного давления путем введения дополнительной дозаряжающей кромки на плунжере исключена нестабильность подач на режимах от 400 до 100 об/мин двигателя. Что позволило снизить дозу запального топлива с 10 до 5% при реализации газодизельного процесса.

Предложенный комплекс мероприятий позволил снизить выброс  $\text{NO}_x$  на 50%, СО на 44% и РМ на 38%, обеспечив в итоге нормы Stage III A без существенного ухудшения расхода топлива. На Рис. 3, 4 и 5 приведен пример конструкции ТНВД, осциллограмма трехфазного впрыска и расход топлива по тепловозной характеристике с использованием ВТЭ.

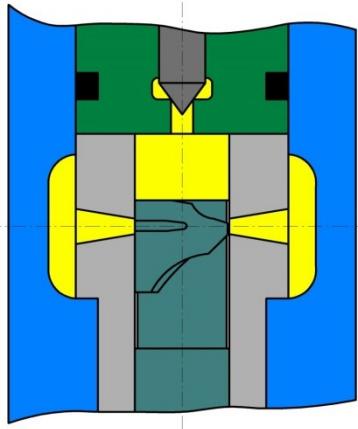


Рис. 3. Пример конструкции плунжера для трехфазной подачи топлива

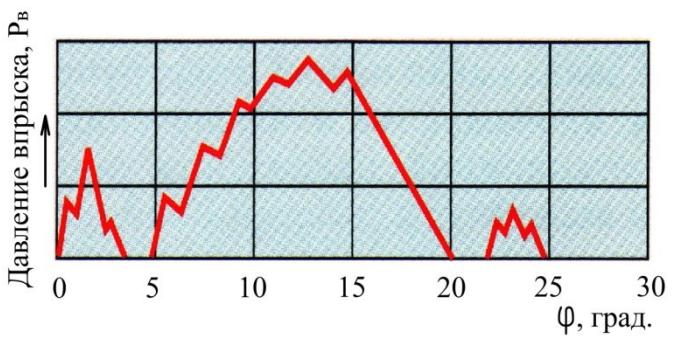


Рис. 4. Осциллограмма трехфазной подачи для дизеля 12Д49М с пониженным уровнем эмиссии.

Исследования показали, что оптимизация величины первой запальной дозы топлива и паузы между первой и второй фазами впрыска обеспечивает снижение выбросов  $\text{NO}_x$ , а оптимизация фазового положения и количество топлива в третьем впрыске снижает выбросы СО. Способ организации процесса горения с использованием трехфазной подачи топлива запатентован (Патенты РФ № 22164300 и № 2377423).

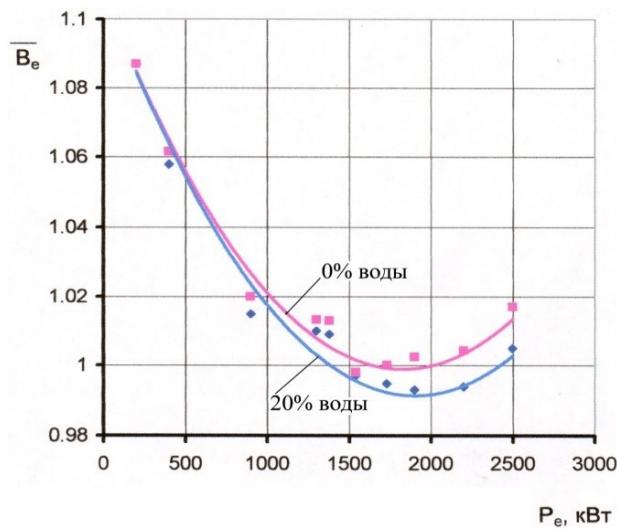


Рис. 5. Изменение удельного эффективного расхода топлива двигателя 21-26ДГ по тепловозной характеристике

Ресурс пары трения корпус ТНВД – толкатель увеличен в три раза за счет предложенного специального профиля поверхности, сформированного методом

пластического деформирования (выглаживание) специинструментом. Режимы выглаживания оптимизированы.

При испытании биотоплива дополнительно исследована совместимость с ним уплотнительных материалов и моторного масла. Выявлено отрицательное влияние биотоплива на противоизносные свойства масла. Сравнительные данные испытаний двигателя на дизельном топливе и биотопливе RME по мощностным, экологическим показателям, и показателям экономичности приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Впрыск однофазный		Впрыск двухфазный	
	Топливо дизельное (УОПТ=26град)	Биотопливо RME (УОПТ =26 град)	Топливо дизельное (УОПТ=26град)	Биотопливо RME (УОПТ =26 град)
На режиме полной мощности $Pe^*$ , кВт	2206	2208	2217	2209
$Pe^*_{\text{НТД}}$ , кВт	2228,1	2246,1	2267,7	2253,2
$b^*, \text{г}/(\text{kBt} \cdot \text{ч})$	205,5	229,7	211,2	239,0
$b_{iso}, \text{г}/(\text{kBt} \cdot \text{ч})$	190,5	212,5	194,1	220,0
Удельные средневзвешенные выбросы вредных веществ, $\text{г}/(\text{kBt} \cdot \text{ч})$				
$e_{NOx}$	13,07	15,39	10,88	11,37
$e_{CO}$	1,67	1,43	2,35	0,94
$e_{CH}$	0,26	0,18	0,75	0,11
Дымность отработавших газов, г, ед. Bosch, min-max	0,23 – 0,73	0,3 – 0,6	0,4 – 0,93	0,2 – 0,43

где  $Pe$  – измеренная полезная мощность двигателя;

$Pe_{\text{НТД}}$  – полезная тормозная мощность, приведенная к условиям НТД;

$b$  – удельный расход топлива, измеренный при условиях испытаний на стенде;

$b_{iso}$  – удельный расход топлива, приведенный в условиям ISO 3046-1.

Предельно допустимые значения эмиссии вредных веществ:

$$e_{NOx} \leq 12,0; e_{CO} \leq 3,0; e_{CH} \leq 0,8; r_{max} \leq 1,6.$$

Из полученных данных видно, что все показатели удельных средневзвешенных выбросов вредных веществ с отработавшими газами в пределах уста-

новленных норм обеспечиваются только при двухфазном впрыске на обоих видах топлива. При этом удельный расход топлива несколько возрастает в сравнении с однофазным впрыском, а при работе на биотопливе RME потребовалось уменьшение общего угла опережения подачи топлива на 1,5 градуса поворота коленчатого вала относительно регулировки для дизельного топлива.

В заключительной части третьей главы приведены результаты работ, позволившие разработать системы топливоподачи для двигателя Д49 газодизельного и газового исполнений, что значительно расширяет возможности этого типоразмерного ряда.

Для двигателей малой энергетики двойного назначения работающих на генераторы переменного тока по нагрузочной характеристике создан относительно простой вариант подачи газа, приведенный на Рис. 6.

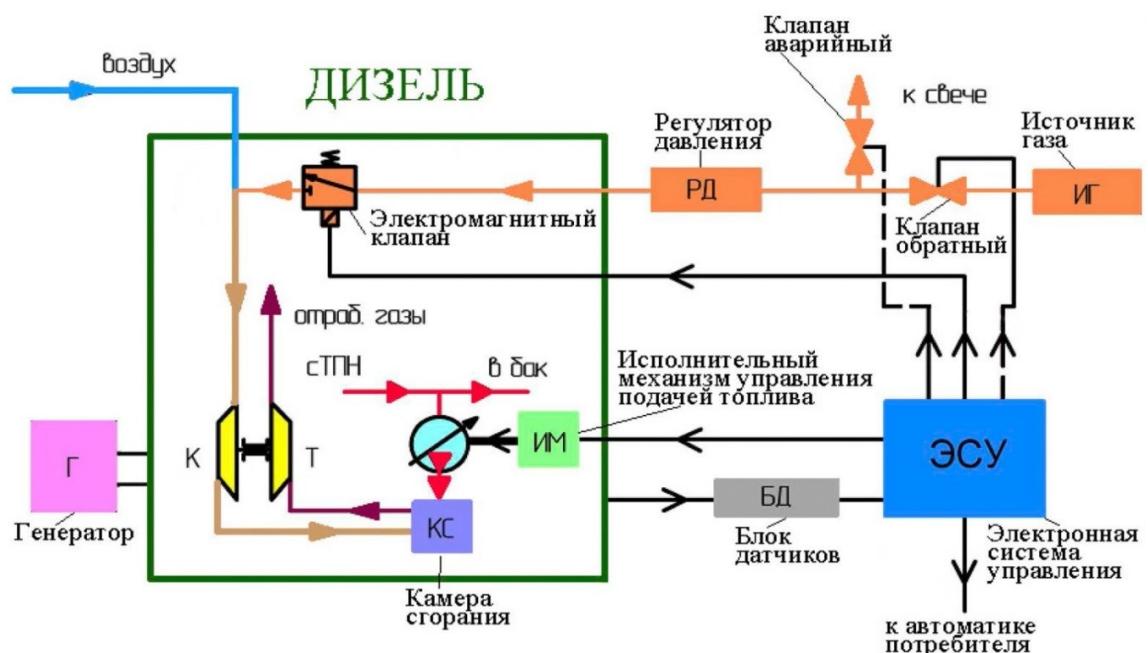


Рис. 6. Структурная схема газодизеля 7ГДГ (12ЧН26/26) с подачей газа в компрессор

На Рис. 7. представлена структурная схема топливной системы с индивидуальным дозированием газа по цилиндрам для газодизеля 1ГДГ (16ЧН26/26) тепловоза 2ТЭ116Г мощностью 2200 кВт, которая представляет собой комбинацию гидромеханической системы подачи запального дизельного топлива, либо сырой нефти, и электронную систему подачи газа.

В ходе исследований и разработки мероприятий, улучшающих характеристики дизелей за счет совершенствования систем питания, 24 технических решения защищены патентами РФ.

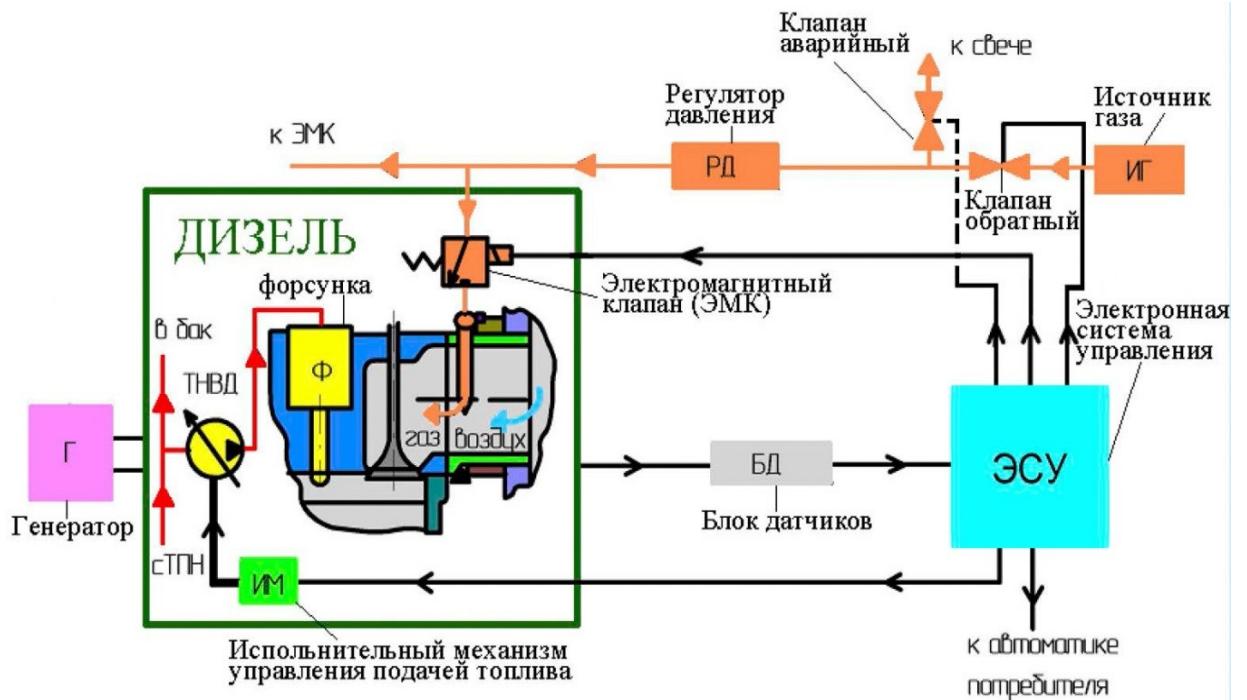


Рис. 7. Структурная схема газодизеля 1ГДГ (16ЧН26/26)  
с индивидуальным дозированием газа по цилиндрам.

**Четвертая глава** посвящена анализу возможностей систем воздухоснабжения, обеспечивающих предельно возможные характеристики двигателей различного назначения при заданных ограничениях по напряженности и максимальному давлению сгорания.

Обобщенные результаты анализа систем воздухоснабжения и достигнутый диапазон характеристик представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Тип системы	Метод исследований		Область эффективности в диапазоне Re100%	Рекомендованная область применения	Внедрение
	теоретический	экспериментальный			
1	2	3	4	5	6
1. Со свободным ТК					
- базовый	+	+	80-100	Серийные локомотивы, малая энергетика	
- с перепуском воздуха и газа		+	10-60	Локомотивы типа 2ТЭ25А	21-26ДГ-01
- с регулируемым сопловым аппаратом	+	+	25 – 90	Тяжелые магистральные локомотивы типа 2ТЭ35А	12ЛДГ500
2. Силовой турбиной	+	+	60–100	-	-
3. Рекуперативная	+	+	60– 00	-	-

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
4. Регистровая					
- без перепуска воздуха и газа	+	+	10–50 60–100	-	-
- с перепуском воздуха, газа, разной настройкой ТК и электронным управлением		+	10–100	Надводные корабли ВМФ нового поколения с фиксированным шагом винта	10Д49, 16Д49
5 Двухступенчатая неуправляемая	+	+	70–100	Подводные лодки	30ДГ, 30ДГМ
6 Двухступенчатая с промежуточным охлаждением воздуха	+		25–90	Надводные корабли с ВРШ. Перспективные локомотивы	В виртуальных моделях

Результаты моделирования показали, что наибольшие возможности по достижению компромиссного решения, удовлетворяющего требованиям экономичности, при ограничении вредных выбросов, обеспечивает двухступенчатая система наддува с промежуточным охлаждением воздуха, состоящая из трех турбокомпрессоров, два из которых работают параллельно в ступени низкого давления и один в ступени высокого давления. Система обеспечивает реализацию работы дизеля по циклу Миллера и предназначена для головного образца двигателя 12ЛДГ500(12ЧН26,5/31) нового типоразмерного ряда двойного назначения. Степень форсирования двигателя по рабочему процессу 2,7 МПА.

Компоновка дизеля 12ЛД500 с двухступенчатой системой турбонаддува в составе дизель-генератора 12ЛДГ500 представлена на Рис. 8.

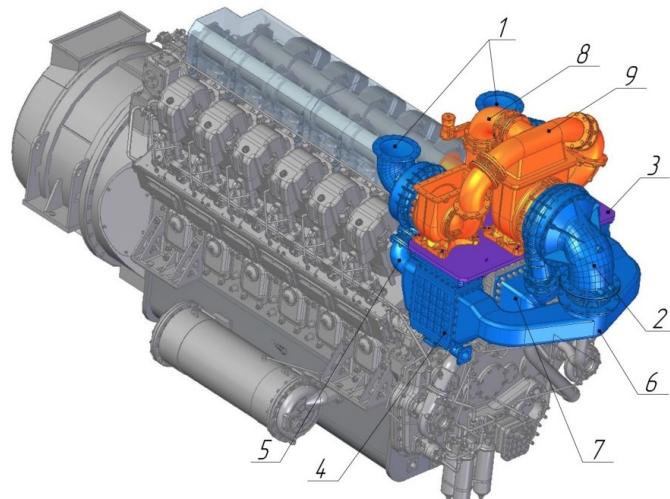


Рис. 8. Дизель-генератор 12ЛДГ500 с двухступенчатой системой турбонаддува

Турбокомпрессор высокого давления ТР61 поз. 2 и два турбокомпрессора низкого давления ТР56 поз.1 размещены на общей монтажной плите поз.3, крепящейся на кронштейне ОНВ. Снизу к этой плате с обеих сторон крепятся промежуточные холодильники надувочного воздуха поз.4. Воздушные улитки турбокомпрессоров низкого давления соединены воздушными патрубками поз.5 с промежуточными холодильниками, а, в свою очередь, промежуточные холодильники соединены воздуховодом поз.6 с воздухоприемным патрубком турбокомпрессора высокого давления поз.2. Улитка турбокомпрессора высокого давления через патрубок 7 соединена концевым холодильником надувочного воздуха.

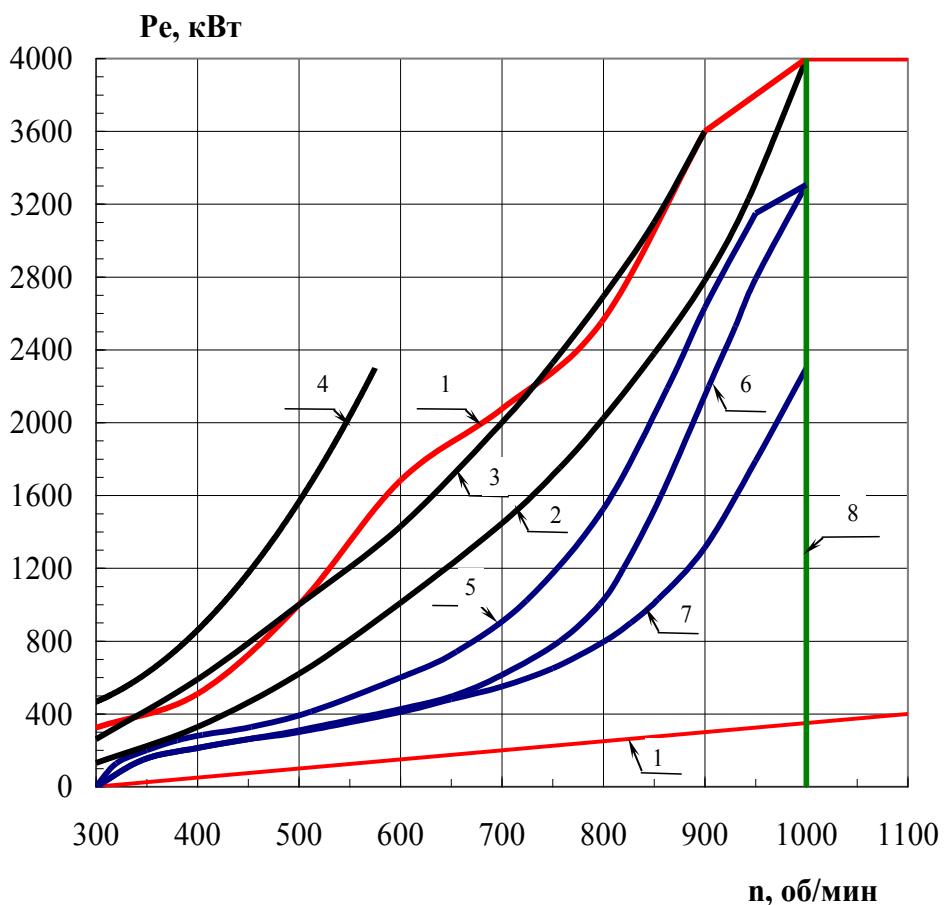
Выпускные коллекторы дизеля соединены с объединяющим патрубком поз.8 турбокомпрессора высокого давления. Турбокомпрессор высокого давления соединен газовым трубопроводом поз.9 с турбокомпрессорами низкого давления.

Согласно представленной компоновке воздух поступает в компрессоры низкого давления ТР56 поз. 1, работающие параллельно, затем по патрубкам поз. 5 подается в промежуточные холодильники поз. 4. После охлаждения воздух по воздуховодам поступает во входной патрубок турбокомпрессора высокого давления ТР61 поз. 2. После вторичного сжатия воздух поступает в концевой охладитель поз.7, пройдя который охлажденный воздух попадает в ресивер дизеля.

Газ от выпускных коллекторов дизеля через объединяющий патрубок поз.8 поступает на турбину турбокомпрессора высокого давления, затем через газовый трубопровод поз.9 подается в турбины низкого давления, где, после срабатывания, выпускается в выхлопную систему тепловоза. Объединяющий патрубок имеет в своем составе байпас, через который возможен перепуск газа от коллекторов, минуя турбину высокого давления непосредственно на вход в турбины низкого давления.

Проведенное моделирование показывает, что на двигателе 12ЛДГ500 при  $P_{me}=2,7$  МПа имеется возможность достижения эмиссии  $NO_x$ , соответствующей нормам IMO Tier III, а в судовом варианте MARPOL 73/78 приложения 6. Представлено виртуальное трехмерное отображение компоновки разработанной двухступенчатой системы на дизеле.

На Рис. 9. представлен достигнутый диапазон характеристик двигателя двойного назначения 16ЧН26/26 с системами воздухоснабжения 1-4 (Таблица 2) для локомотивного судового и генераторного вариантов исполнений.



- 1-Нижняя и верхняя ограничительные характеристики судового исполнения;
- 2,3,4-Винтовые характеристики;
- 5,6,7-характеристики тепловозного исполнения;
- 8-астатическая характеристика дизель-генератора

Рис. 9. Диапазоны режимов дизеля двойного назначения 16ЧН26/26

**Пятая глава** посвящена особенностям моделирования напряженно-деформированного состояния деталей и оценки их прочностной надежности, поскольку одной из главных задач конструктора при создании форсированного среднеоборотного двигателя двойного назначения является синтез конструкции с минимально возможными весогабаритными показателями при достаточных запасах прочности.

Иерархия прочностных моделей представлена в виде выделенных наиболее характерных предельных состояний: усталостное циклическое разрушение с оценкой по пределу выносливости; термоусталостное циклическое разрушение с оценкой по долговечности или по пределу термической усталости; статическое разрушение, оцениваемое по пределу прочности или по пределу текучести; длительное статическое разрушение в условиях повышенных температур (ползучесть) с оценкой по пределу длительной прочности.

В условиях резкой переменности нагрузочных состояний рекомендуется использовать многопозиционную модель нагружения через  $5\text{--}10^0$  угла поворота коленчатого вала в пределах рабочего цикла двигателя. Расчеты базируются на современных хорошо проверенных методиках с применением МКЭ. В этой области следует отметить работы С.В. Серенсена; И.А. Биргера; М.А. Салтыкова; Н.Д. Чайнова; М.И. Раенко; М.А. Сальникова; и др.

Полученные величины запасов прочности должны быть подтверждены результатами натурных усталостных испытаний с перегрузкой в 1,6...2,0 раза. В Таблице 3 представлены рекомендуемые минимально допустимые величины запасов прочности основных деталей двигателя.

Таблица 3

Наименование основных несущих деталей	Материал	Границы запасов прочности	Коэффициент перегрузки при испытаниях
Блок цилиндров (блок-картер)	Сталь 20,20Л	1,8-2,2	2,0
	Чугун ЧШГ	1,9-2,2	2,1
Коленчатый вал	Сталь	1,6-1,9	1,8
	Чугун ЧШГ	1,7-2,0	1,9
Поршень (головка)	Сталь	1,5-1,9	1,7
	Чугун	1,6-2,0	1,8
Поршень (tronk)	Алюминиевый сплав АК	1,4-1,7	1,6
Поршневой палец	Сталь ГОСТ 4543-71	1,6-2,0	1,8
Втулка цилиндра	Чугун ХНМ, ЧШГ	1,5-1,8	1,7
Шатун	Сталь ГОСТ 4543-71	1,6-2,0	1,8

В разделе подробно раскрыты характерные предельные состояния. В ходе проведения расчетных и экспериментальных работ разработан новый нерезонансный метод испытаний коленчатых валов на кручение, защищенный патентом РФ.

Наибольшую сложность при расчетах на прочность представляет оценка надежности теплонапряженных деталей, в связи с чем во втором разделе третьей главы представлена методика такой оценки по критерию долговечности (отношению числа циклов до разрушения к заданному на срок службы) на примере крышки цилиндра форсированной модели двигателя 16ЧН26/26. Расчет ведется на основе МКЭ в трехмерной постановке с использованием систем конечно элементного моделирования и анализа MSC.PATRAN и MSC.MARC.

Оценка долговечности крышек цилиндров является комплексной проблемой, требующей решения следующих задач:

-определение уровня и характера распределения температур в конструкции на характерных режимах форсирования двигателя;

-моделирование процесса возникновения знакопеременных пластических деформаций в периоды нагрева и остывания крышки цилиндра с учетом реологических явлений при повышенных температурах, приводящих к постоянному росту остаточных напряжений в наиболее нагруженных элементах крышки в процессе эксплуатации;

-определение фактического сопротивления материала крышки цилиндра термоциклическому разрушению, а также его релаксационной стойкости в различных диапазонах рабочих температур;

-определение типового блока нагрузок, эквивалентного по повреждающему воздействию (числу циклов теплосмен и времени выдержки на максимальной температуре) на крышку цилиндров эксплуатационному спектру нагрузок.

Расчет теплового состояния крышек цилиндров основывается на решении стационарной задачи теплопроводности с условно стационарными граничными условиями третьего рода. Построение модели нелинейной среды выполнено с использованием тензоров напряжений Пиолы-Кирхгофа и тензоров деформаций Грина. Построение глобальной матрицы жесткости конструкции осуществляется на основе стандартной процедуры суммирования по всем элементам.

Для моделирования знакопеременных пластических деформаций и определения остаточных напряжений, возникающих в крышке цилиндра в условиях теплосмен, приращение полной деформации определяется суммой приращений упругой деформации  $\Delta\varepsilon_{ij}^e$ , пластической деформации  $\Delta\varepsilon_{ij}^p$ , деформации пластического последействия (ползучести)  $\Delta\varepsilon_{ij}^c$  и термических деформаций  $\Delta\varepsilon_{ij}^T$ . При решении пластической задачи используется теория течения Хилла Р. с условиями Мизеса-Генки и учетом деформационного упрочнения на основе кинематической теории и эффекта Баушингера при знакопеременной нагрузке. Поскольку наибольшим количеством циклов теплосмен за контрольное время подвергаются детали тепловозных двигателей, то расчет следует вести на основе их графика нагрузления. Результаты расчета справедливы для судовых дизелей и дизель – генераторов стационарных установок. Уровень остаточных напряжений косвенно характеризует располагаемый ресурс конструкции и темп приближения к опасному состоянию. Сопоставление расчета с экспериментальными данными показало, что расчетные значения остаточных напряжений в наиболее напряженных элементах огневого днища лежат в области, ограниченной 90% доверительным интервалом. Таким образом, показана адекватность принятой математической модели.

Выполненные исследования показали, что при оценке прочности крышек цилиндров необходимо рассматривать два фактора: термическую усталость и знакопеременные пластические деформации в циклах сжатие - растяжение. При оценке по второму фактору необходимо учесть время релаксации для определения эффекта Баушингера и оценить величины предела упругости

при упрочнении с последующей оценкой времени достижения предельного состояния. Конечно-элементная модель крышки цилиндра 16ЧН26/26 и результаты расчета полей температур на режиме номинальной мощности в цилиндре 375 кВт показаны на Рис. 10 и Рис. 11.

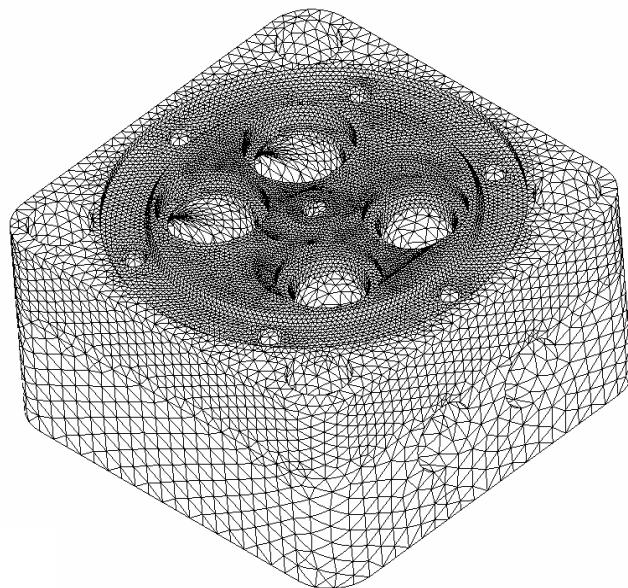
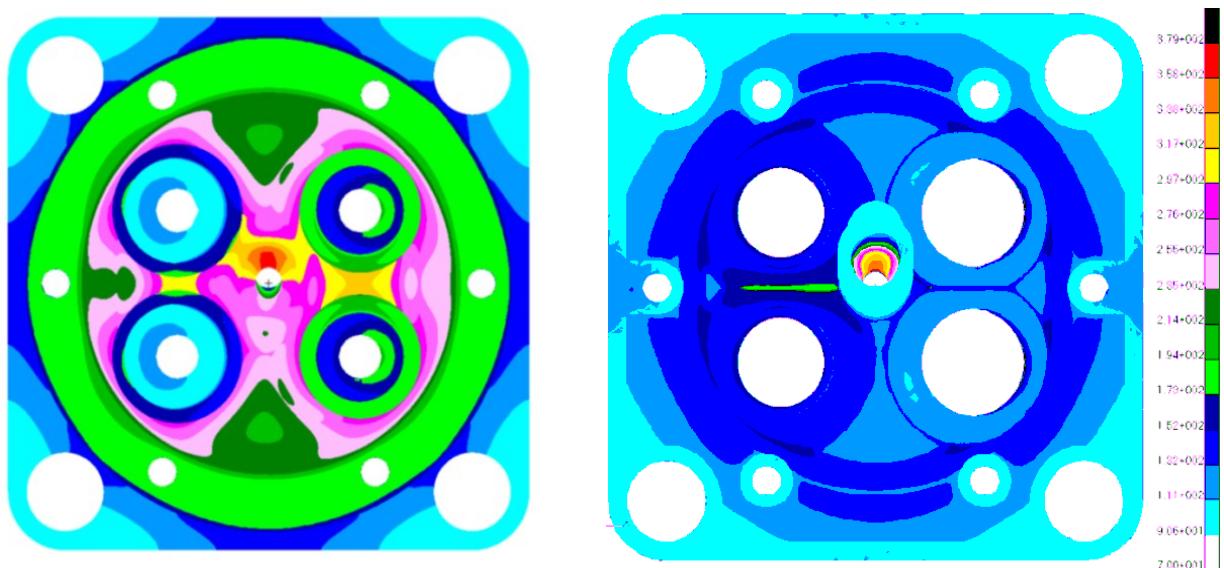


Рис. 10. Конечно-элементная модель крышки



а—со стороны камеры сгорания

б—со стороны полости охлаждения

Рис. 11. Поля температур в крышке цилиндра дизеля 16ЧН26/26

При температурах  $\leq 350^{\circ}\text{C}$  более значимым является первый фактор, при температурах  $\sim 400^{\circ}\text{C}$  второй фактор. Эти факторы определяют вероятность разрушения. Долговечность крышки цилиндров при уровне амплитуд термических напряжений согласно представленным данным, при указанном уровне переменных напряжений 241 МПа и максимальной температуре перемычки между клапанами  $350^{\circ}\text{C}$  составил 72000 циклов при заданном ресурсе 20600 циклов до капитального ремонта. Таким образом, запас по долговечности по первому фактору составит 3,5.

**В шестой главе** представлены особенности проектирования среднеоборотного двигателя двойного назначения с учетом разработанных мероприятий по совершенствованию систем питания и воздухоснабжения.

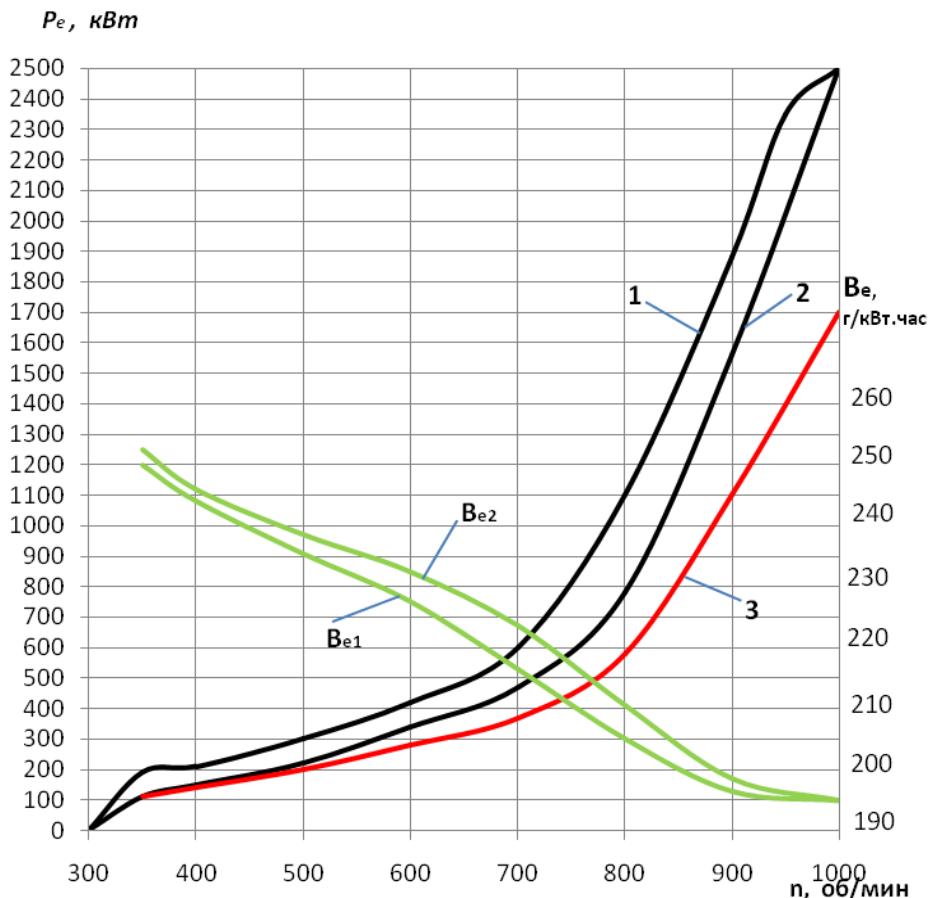
Показано, что ухудшение рабочего процесса на холостом ходу и малых нагрузках связано, главным образом, с излишней дальностью топливного факела, несмотря на значительно меньшее давление впрыскивания по отношению к номинальным режимам. Проведенные экспериментальные и расчетные исследования показали, что для улучшения рабочего процесса на холостом ходу и малых нагрузках дизеля 4-36ДГ (8ЧН36/26) оптимальное давление впрыска составляет 20 МПа. При этом необходима межцикловая нестабильность не более 3%, управление опережением подачи от 5 град п.к.в. на холостом ходу до 25 град п.к.в. на номинальном режиме. Целесообразно повысить степень сжатия до 15, сместить настройку турбокомпрессора в зону средних нагрузок, применить управляемый наддув и отключать половину цилиндров на 0 и 1 позициях контроллера. Обеспечив высокую межцикловую стабильность впрыскивания полезно снизить частоту вращения на холостом ходу до 300 и менее оборотов, если позволяет несущая способность шатунных подшипников.

Совокупность мероприятий по совершенствованию топливной аппаратуры (создание систем импульсного действия с использованием мероприятий, изложенных в главе 3), воздухоснабжения с внедрением управляемой системы турбонаддува, увеличения степени сжатия до 15 и максимального давления сгорания до 16,5 МПа, а так же разработка нового алгоритма управления с нелинейной разбивкой тепловозной характеристики позволили создать дизель – генератор четвертого поколения 21-26ДГ-01 (12ЧН26/26) для первого в России тепловоза 2ТЭ25А с передачей переменно - переменного тока. Поля рекомендуемых режимов работы 21-26ДГ-01 представлены на Рис. 12.

С целью обеспечения стабилизации мощностных и скоростных режимов предложен новый способ формирования скоростных режимов (ПАТ 2621794 РФ). Предложенный способ реализован на двигателях 18-9ДГ-01 для тепловозов серии 2ТЭ116УМ эксплуатации в горных условиях Монголии, где за счет этого достигнуто увеличение скорости и объема грузоперевозок на 15%.

Сущность метода заключается в том, что в нормальных стандартных условиях система топливоподачи и воздухоснабжения обеспечивают мощность двигателя с учетом возможного ее снижения при переходе в высокогорные условия, то есть с превышением по отношению к нормальным условиям. По мере подъема регулятор частоты и мощности обеспечивают постоянство задан-

ной скорости при заданных ограничениях цикловой подачи и оборотах ТК. При выходе на эти ограничения цикловая подача не может быть увеличена, что предотвращает перегруз дизеля.



1 и 2- верхняя и нижняя тепловозные характеристики; 3-селективная характеристика;  $B_{e1}$  и  $B_{e2}$ -удельные эффективные расходы топлива при заданных ограничениях по экологии

Рис. 12. Поля рекомендуемых режимов работы дизеля дизель-генератора 21-26ДГ-01 (12ЧН26/26)

Для боевых надводных кораблей наиболее тяжелые режимы возникают в процессе предельных эволюций корабля (разгон до полного хода, реверс с полного переднего хода на полный задний, левый и правый развороты с предельной перекладкой руля). Для обеспечения предельно возможных характеристик силовой установки очень важно получить высокую ограничительную характеристику во всем диапазоне винтовой характеристики. Разработанная управляемая система турбонаддува позволила создать новый высокофорсированный двигатель 16Д49 (16ЧН26/26) мощностью 4412 кВт, а комбинация из четырех двигателей главную силовую установку корабля нового поколения класса «Корвет» (проект 20380), обеспечившую все предельные заданные характеристики корабля, включая запуск двигателя с присоединенной пропульсивной системой.

Конструкция двигателя защищена патентом 2383756 РФ. В целом группа ведущих специалистов за создание корабля и силовой установки удостоена Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Область режимов работы дизеля 16Д49 представлена на Рис. 13.

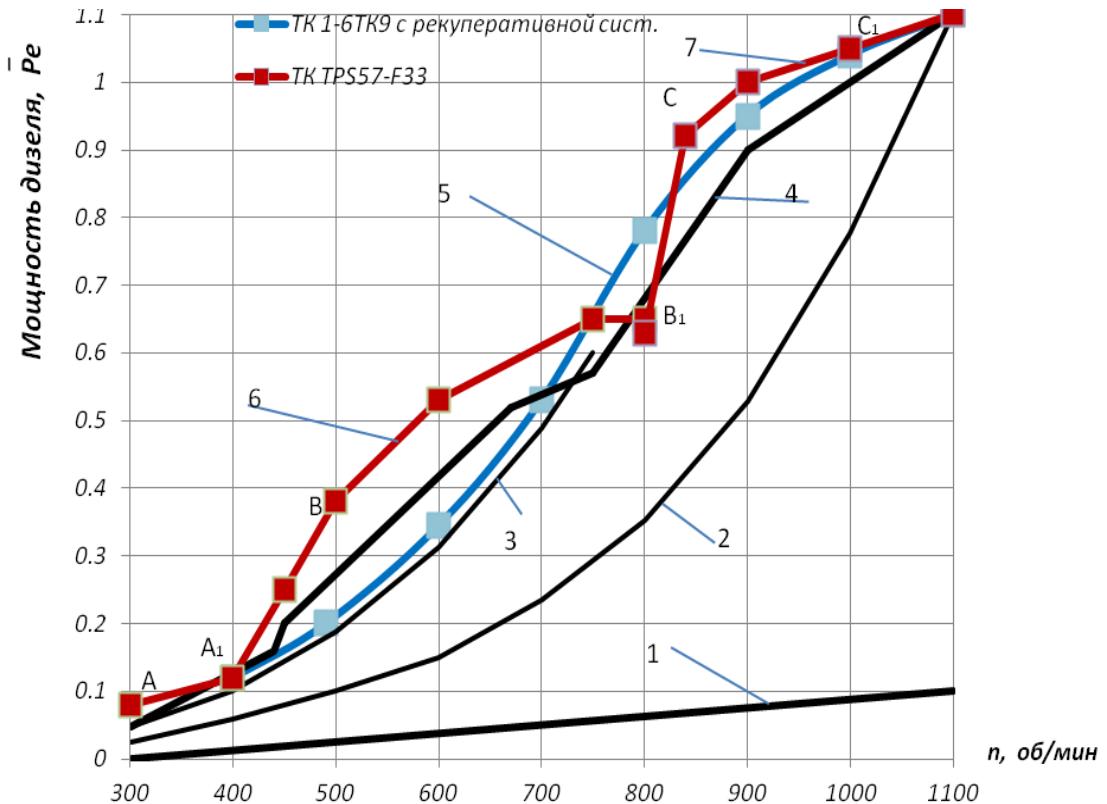


Рис. 13. Области работы судового дизеля 16Д49

На рисунке представлены результаты испытаний двигателя с двумя вариантами воздухоснабжения: рекуперативной с одним 1-6ТК9 производства ОАО «Коломенский завод» и разработанной управляемой регистровой с использованием двух ТК TPS57-F33 фирмы ABB. Использование малоинерционных высокооборотных ТК TPS57-F33 обеспечивает существенное увеличение мощности двигателя при отключении одного ТК на режимах А<sub>1</sub>-В-В<sub>1</sub> наиболее частых эволюций корабля улучшая, за счет этого, его маневренность, то есть ТТХ. Такой же эффект получен и на режимах экстремальных эволюций В-С-С<sub>1</sub>.

Весьма важной характеристикой судового двигателя является дымность отработавших газов на неустановившихся режимах из-за инерционности агре-

гатов наддува, поэтому были проведены исследования влияния газодинамической подкрутки ротора турбины на приемистость и дымность двигателя. Испытания проведены на двигателе 16Д49. Подкрутку осуществляли с помощью реактивной сверхзвуковой горелки с плазменным зажиганием установленной на газовом трубопроводе перед неотключаемой турбиной. Результаты испытаний представлены на Рис. 14.

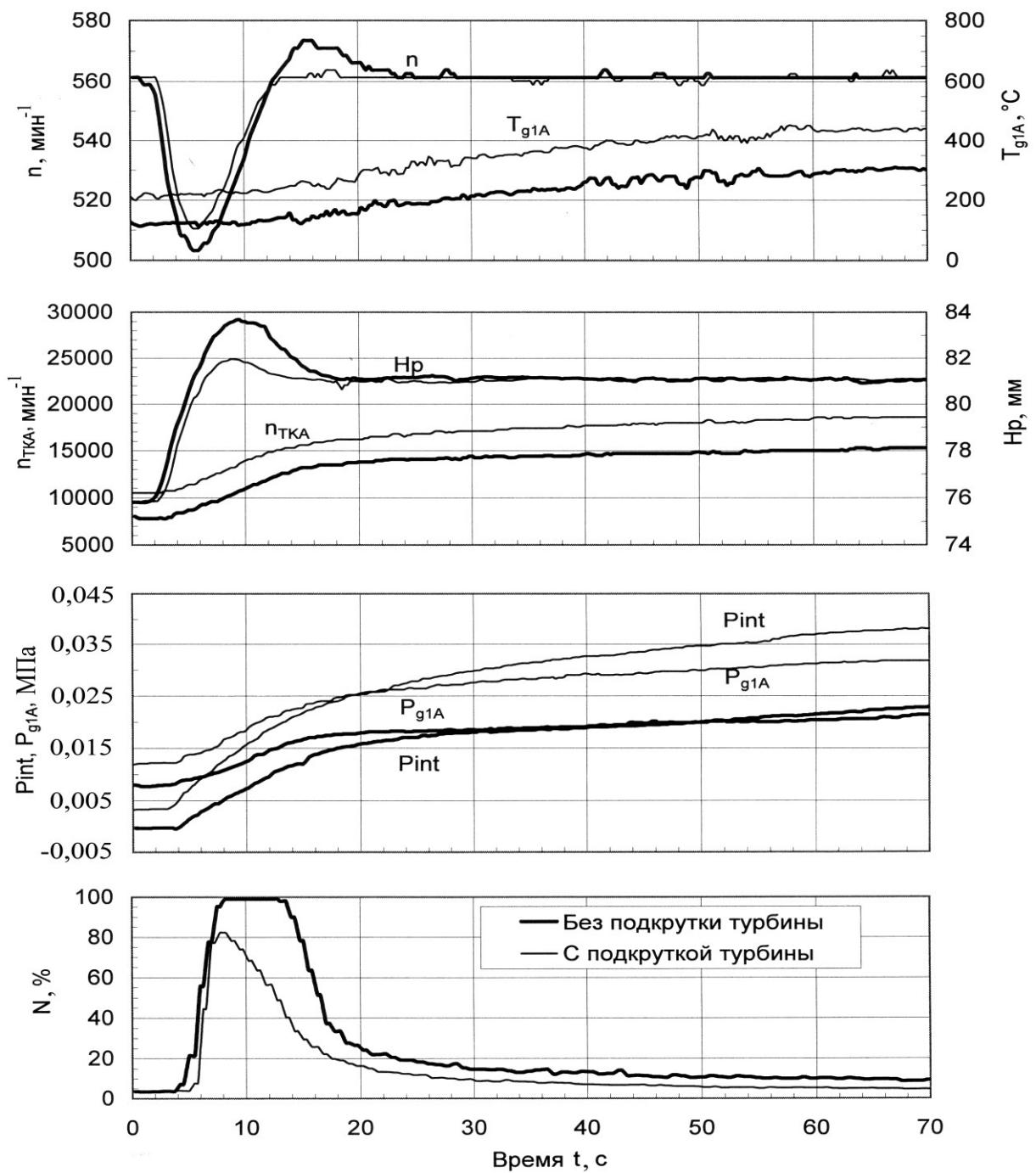


Рис. 14. Влияние газодинамической подкрутки турбины на дымность при нагружени по нагрузочной характеристике ( $n=560 \text{ мин}^{-1}$ ) с одним ТК.

Учитывая исключительную важность пусковых свойств дизель - генераторных установок специального назначения, в третьем разделе шестой главы приведены результаты специальных исследований пусковых свойств среднеоборотного двигателя 22ДГМ (8ЧН26/26), которые позволили установить следующее:

- время прокрутки дизеля до начала подачи воздуха в цилиндры зависит от параметров масла, определяющих механические потери и инерционности движущихся масс двигателя;
- время разгона двигателя на топливе обеспечивается уровнем давления впрыска, которое для холодного двигателя составляет 10 МПа, а для горячего 7,5 МПа;
- при использовании экспериментальных электронных систем регулирования частоты минимальное время пуска достигается без заброса по частоте вращения;
- вязкостно-температурные характеристики масла оказывают существенное значение на время пуска и затраты энергии на прокручивание двигателя;
- законы регулирования регулятора частоты вращения на время разгона двигателя влияния не оказывают;
- кроме учета вязкостно-температурных ограничений по маслу при моделировании процессов пуска необходимо учитывать угол опережения подачи топлива;
- оптимальное время пуска, при прочих ограничениях, достигается заданием постоянного времени опережения, обеспечивающего изменение угла опережения впрыска от минимально-допустимого, при котором достигается максимальная температура воздуха в конце сжатия, до максимального, при достижении заданной частоты вращения;
- при пуске холодного двигателя предпочтительнее обеспечить многофазный впрыск с коррекцией по опережению подачи топлива.

На основании исследований предложен способ автоматического пуска среднеоборотного двигателя, защищенный патентом 2571879 РФ. Сущность способа заключается в запуске двигателя без прокачки маслом с одновременной подачей пускового воздуха в пневмостартер и цилиндры при задании времени опережения подачи топлива. Постоянство времени опережения при разгоне двигателя автоматически обеспечивает изменение угла опережения подачи топлива от минимально-заданного до номинального, что приводит к уменьшению времени пуска. Прокачка маслом осуществляется лишь периодически в период отстоя двигателя

В заключительной части шестой главы приведены результаты исследований по выбору и обоснованию браковочных показателей моторного масла.

## **Основные выводы и заключение по диссертационной работе**

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования показали, что путем совершенствования систем питания и воздухоснабжения возможно значительное улучшение характеристик среднеоборотных двигателей двойного назначения и расширение области их применения за счет вариативности систем питания и воздухоснабжения. Полученные при исследованиях результаты сводятся к следующим основным выводам.

1. Одной из важнейших задач современного двигателестроения является поиск компромиссного сочетания главных факторов, обеспечивающих приемлемое сочетание экономических, экологических и ресурсных показателей при заданном уровне форсирования по рабочему процессу, которое может быть весьма эффективно обеспечено средствами топливоподачи и воздухоснабжения.

2. Анализ особенностей проектирования в современных условиях в условиях жесткой конкуренции показал, что для сокращения сроков проектирования при повышении качества проекта требуется систематизация применяемых методик, выстроенная в иерархическую систему, интегрированную в САПР и единое информационное пространство PLM и ERP систем и удовлетворяющую приведенным условиям.

3. Предложенная схема комплексного использования ЭВМ с использованием разработанной структурной схемы цикла проектных работ при разработке и постановке на производство дизельных среднеоборотных двигателей двойного назначения позволяет обеспечить параллельно-последовательный процесс разработки с сокращением времени их постановки на производство в два раза при уменьшении количества исполнителей в 2,5 раза.

4. Предложенная методика предварительного выбора параметров основных элементов топливной системы среднеоборотного двигателя позволяет получить исходные данные для моделирования и их параметрической оптимизации с помощью моделей высокого уровня.

5. Уточненная инженерная методика гидродинамического расчета процесса подачи топлива позволяет с достаточной точностью определить гидравлические характеристики, механические нагрузки и сформировать профиль кулачка топливного насоса по заданным характеристикам.

6. Выполненное моделирование и испытания систем воздухоснабжения применительно к локомотивным, судовым и дизель-генераторным установкам позволило определить целесообразность использования проанализированных систем для двигателей указанного назначения, с модернизацией конструкций систем, введением электронного управления перепуском воздуха и газов, газодинамической подкрутки роторов ТК и отключением ТК в регистровой схеме.

7. Разработана и внедрена регистровая управляемая система турбонаддува двигателей 10Д49 (16ЧН26/26) и 16Д49 (16ЧН26/26) для кораблей нового поколения Корвет (проект 20380) и Фрегат (проект 22350).

8. Выделены особенности проектирования двухступенчатых систем турбонаддува промежуточным охлаждением наддувочного воздуха обеспечивающие рабочий процесс по циклу Миллера. На основе выполненного анализа спроектированы и построены виртуальные образцы двухступенчатых систем для двигателей нового поколения 16ЛДГ300 (16ЧН26/28) и 12ЛДГ500 (16ЧН26,5/31), созданных по Государственной программе «Национальная технологическая база».

9. Выполненный анализ иерархической системы моделей оценки прочности позволил уточнить метод оценки теплонапряженных деталей двигателя по критерию долговечности.

10. Анализ особенностей конструирования топливных систем на основе накопленного опыта позволил разработать и внедрить ряд конструкторских решений по управлению топливоподачей с одно, двух и трехфазным впрыскиванием, обеспечивающих выполнение международных экологических норм по улучшению показателей надежности и повышению ресурсных показателей при увеличении давления впрыска.

11. Предложены новые технические решения на основе которых созданы, исследованы и внедрены в производство системы питания для газодизельной и газовой модификации двигателей семейства Д49 (1ГДГ; 7ГМГ; 8ГМГ) с электронной системой управления распределенной подачей газа.

12. Предложены уточненные способы формирования характеристик и выделены особенности конструирования локомотивных, судовых и дизель-генераторных двигателей позволяющие, с использованием новых предложенных технических решений, в короткие сроки создать эффективные энергетические установки для тепловозов нового поколения 2ТЭ25А, подводных лодок четвертого поколения проектов 677 («Лада») и 955А (Борей), надводных кораблей проектов 20380 (корвет «Стерегущий»); 22350 (фрегат «Адмирал Кузнецов»); 22100 и 22160 (кораблей патрульной зоны); 11711 (десантный корабль «Иван Грен») и 15Д49 для АЭС БУШЕР.

13. На основе опыта эксплуатации тепловозных дизелей и испытаний ряда моторных масел предложены уточненные браковочные показатели масел, определяющие своевременность их замен.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.**

1. Рыжов В.А. Топливная система импульсного действия для среднеоборотного дизеля /В.А.Рыжов // Локомотив. М., 1999 №8(512), С.30-31. (0,12 п.л.)
2. Рыжов В.А. Пути совершенствования топливной аппаратуры. Электронные системы топливоподачи для дизеля. /В.А.Рыжов // Локомотив, №5,2001,С.34- 36. (0,18 п.л.)
3. Рыжов В.А. Перспективы развития высокофорсированного транспортного двигателя. /В.А.Рыжов // Тяжелое машиностроение. М., 2002, №9, С.52-54. (0,18 п.л.)
4. Рыжов В.А., Капитанов С.А., Землянский В.В. Гидродинамическое моделирование процесса подачи топлива в среде программирования Borland Delphi // Вестник машиностроения, М., 2002, №8, С.9-11. (0,18/0,12 п.л.)
5. Рыжов В.А., Перов К.Ю. Расширение области работы четырехтактного дизеля средствами системы турбонаддува // Двигателестроение, С. Петербург, 2003. №4, С. 12-15. (0,24/0,18 п.л.)
6. Рыжов В.А. Создание топливной аппаратуры для типоразмерного ряда дизелей ЧН26/26 /В.А.Рыжов // Двигателестроение, С. Петербург, №2, приложение №1, 2003, С.2-3. (0,12 п.л.)
7. Рыжов В.А. Развитие и уровень параметров дизелей Коломенского завода /В.А.Рыжов // Двигателестроение, С. Петербург, №2, приложение 1, 2003, С.13-14. (0,12 п.л.).
8. Рыжов В.А. Повышение эффективности дизеля 8ЧН26\26 на режимах работы маневрового тепловоза /В.А.Рыжов // Двигателестроение, С. Петербург, №1, 2006, С.3-6. (0,24 п.л.).
9. Рыжов В.А. Новое поколение типоразмерного ряда Д49 /В.А.Рыжов // Двигателестроение, С. Петербург, №3, (225), 2006, С.3-5. (0,18 п.л.)
10. Рыжов В.А. Водотопливные эмульсии как средство улучшения работы дизеля // Локомотив, М., 33, 2007, С.31-32. (0,18 п.л.).
11. Рыжов В.А. Технологии, повышающие экологическую безопасность тепловозных дизелей /В.А.Рыжов // Двигателестроение, №1 (231), 2008, С.36-41. (0,3 п.л.).
12. Рыжов В.А., Ткачев В.Т. Моторные масла для форсированных тепловозных дизелей /В.А.Рыжов // Локомотив, М., №11, 2008, С.33-36. (0,12/0,12 п.л.).
13. Раенко М.И., Рыжов В.А. Оценка прочностной надежности крышек цилиндров транспортных дизелей по критерию долговечности // Двигателестроение, С. Петербург, №1 (247), 2012, С.7-17. (0,66/0,33 п.л.).

14. А.С.1724916 СССР. МКИ F 02 М 21/02. Устройство подачи газа для двигателя внутреннего сгорания / В.А.Рыжов, А.Ю.Лебедев (СССР) - №4439837/06; Заявлено 25.09.1989; Опубл.07.04.1992, Бюл.№3.

15. Рыжов В.А., Печенин В.В. Совершенствование дизелей 16Д49 дизель-дизельных агрегатов 1ДДА12000 кораблей корвет проекта 20380 // Двигателестроение, С. Петербург, №1 (255), 2014, С.12-19. (0.48/0.32 п.л.).

16. Пат.2377423 РФ, F 02B 3/12. С1. Способ работы двигателя внутренне-го сгорания / В.А.Рыжов, П.В.Кулаев (России). №2008119553/06; Заявлено 20.05.2008; Опубл. 27.12.2009, Бюл.№36.

17. Пат.2009361 РФ, F 02 МО 51/00. Топливный насос высокого давления двигателя внутреннего сгорания / В.А.Рыжов, П.В.Кулаев (России). №4870802/06; Заявлено 02.10.1990; Опубл. 15.03.1990, Бюл.№5.

18. Пат.2117816 РФ, F 02 М 55/02. Топливопровод высокого давления двигателя внутреннего сгорания / Е.А.Никитин, В.А.Рыжов, П.В.Кулаев (России). №497102881/06; Заявлено 25.02.1997; Опубл. 20.08.1998, Бюл.№23.

19. Пат.2383756 РФ, F 02 D 32/2. Двигатель внутреннего сгорания с высо-кой ограничительной характеристикой и высокой скоростью приема нагрузки / В.А.Рыжов, К.Ю.Перов, М.А.Колесников и др. (России). №200813251/Л06; За-явлено 06.10.1994; Опубл. 10.03.2010, Бюл.№7.

20. Пат.2009362 РФ, F 02 МО 51/06. Устройство впрыскивания топлива для дизеля / В.А.Рыжов, П.В.Кулаев (России). №4931725/06; Заявлено 26.04.1991; Опубл. 15.03.1994, Бюл.№5.

21. Пат.2373422 РФ, F 02 МО 59/00. Система впрыска топлива для двига-телей внутреннего сгорания / В.А.Рыжов, П.В.Кулаев (России). №200810625/06; Заявлено 21.02.2008; Опубл. 20.11.2009, Бюл.№32.

22. Пат.2476697 РФ, F02B 37/007, 37/04, 37/12. Двигатель внутреннего сгорания с высокой ограничительной характеристикой / В.А.Рыжов, С.Н.Орехов (России). №2011101670/06; Заявлено 19.01.2011; Опубл. 27.02.2013, Бюл.№21.

23. Пат. ПМ152514 РФ, F02B63/04. Дизель –генераторная установка для резервного электроснабжения систем безопасности АЭС / В.А.Рыжов, В.В.Калиниченко (России). №2014137653/06; Заявлено 18.09.2014; Опубл. 10.06.2015, Бюл.№16.

24. Пат.2571879 РФ, F01M5/00, F02N19/00. Способ автоматического пуска среднеоборотного двигателя внутреннего сгорания / В.А.Рыжов, В.В.Калиниченко (России). №22014137655/06; Заявлено 18.09.2014; Опубл. 17.12.2015, Бюл.№16.

25. Пат. ПМ163482 РФ, F02B 37/00, F02D29/06. Система для уменьшения длительности переходного процесса и повышения качества тока дизель-

генератора с турбонаддувом/ В.А.Рыжов, В.В.Калиниченко, В.А.Зоренко (России). №2015150562/06; Заявано 26.11.2015; Опубл. 20.06.2016, Бюл.№16.

26. Рыжов В.А. Расчет типовых параметров системы питания дизельного двигателя /В.А.Рыжов// Новые технологии. М., №3, 2005, С24-26. (0,54 п.л.).

27. Рыжов В.А. Особенности систем питания газожидкостных двигателей /В.А.Рыжов // Турбины и дизели. М., №7, 2009, С.22-24. (0,18 п.л.).

28. Рыжов В.А. Разработка и внедрение технологий, повышающих экономические показатели двигателей для локомотивов // Сборник докладов Международной конференции Железнодорожное машиностроение. Перспективы, технологии, приоритеты. М., 2007, С.56-57. (0,18 п.л.).

29. Рыжов В.А. Особенности проектирования базовой модели дизеля нового типоразмерного ряда Д500К в современных условиях // Сборник докладов. Актуальные проблемы развития поршневых ДВС. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 120-летию Ваншейдта В.А. С. Петербург, ноябрь 2010, С.14-15. (0,18 п.л.)

30. Раенко М.И., Рыжов В.А. Оценка прочности деталей двигателей по различным критериям предельного состояния // Сборник трудов Международной конференции «Двигатель-2010», посвященной 180-летию МГТУ им Н.Э. Баумана. М., 2010, С.100-105. (0,3/0,15).

31. Оптимизация системы турбонаддува для новой платформы двигателей Д500 Коломенского завода / Рыжов В.А.[и др.] // Конгресс CIMAC: сборник докладов. Хельсинки, 2016, докл., №290. 30 с. (0,72/0,24 п.л.).