

М 498241

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ГОРБАНЕВСКИЙ Виктор Евгеньевич

УДК 621.436-03-192

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ВЫСОКОТОЧНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ
АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЕЙ

Специальность 05.04.02 - тепловые двигатели и
05.02.04 - трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1991

Работа выполнена в Московском институте приборостроения.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Болдырев И.В.

доктор технических наук, профессор

~~Алексеев Ч.В.~~
~~Патракальцев Н.Н.~~

доктор технических наук, профессор

Карасик И.И.

Ведущее предприятие: Ногинский завод топливной аппаратуры - НЗТА

Защита состоится "13" ноября 1991 г. в 14 часов
на заседании специализированного совета Д 053.15.10 "Тепловые
и гидравлические машины" МГТУ им. Баумана Н.Э. по адресу:
107005, Москва, Лефортовская набережная, 1, корпус "Энергома-
шиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ

вух экземплярах, заверен-
дресу: 107005, Москва,
умана Н.Э., ученому секре-
53.15.10.

И 498241

ноября 1991 г.

Иван

Н.А.Иващенко

323. Объем 2.0 п.л. Тир. 100.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Документом "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986-1990 гг. и на период до 2000 года" в двенадцатой пятилетке намечено довести до 40-45% общего выпуска производство дизельных грузовых автомобилей с уменьшенным на 25-30% (по сравнению с бензиновыми) удельным потреблением топлива, ускорить переход на производство легковых автомобилей с дизельными двигателями, снизить удельный расход топлива автомобилями за счет совершенствования конструкции двигателей, снизить удельный расход топлива тракторами и комбайнами, где используются только дизели, на 10-12%, увеличить выпуск тепловозов и дизелей к ним. Кроме того, там же поставлено требование ко всему машиностроению - обеспечить увеличение надежности, а следовательно, долговечности и безотказности, как составляющих факторов надежности, всех вновь осваиваемых видов техники в 1,5-2 раза по сравнению с выпускаемой аналогичной продукцией.

Известно, что экономичность рабочего процесса и токсичность отработавших газов двигателя в значительной степени зависят от исходного качества процесса впрыска топлива его топливной аппаратурой (ТА). В процессе эксплуатации дизелей тракторного, автомобильного, тепловозного назначения часто наступает заметное ухудшение исходных параметров топливоподачи, вызываемое сильным износом и схватыванием ряда деталей ТА, что приводит к ухудшению экономичности дизеля, снижению его мощности, затрудненному запуску при низких температурах, повышению токсичности отработавших газов и ухудшению экологической обстановки в зонах сосредоточения большого числа транспортных средств, и даже к полной остановке транспортных установок. Четкие представления о причинах повышенного износа и схватывания деталей пар трения (ПТ) ТА отсутствуют, что тормозит работы по повышению ресурса и улучшению экономичности существующих дизелей и созданию новых дизелей. Решению этой научно-технической проблемы, сдерживающей развитие отраслей дизелестроения и транспорта, и посвящена настоящая работа.

Цель и задачи исследования. Целью работы является создание общего подхода к проблеме обеспечения и сохранения требуемых



характеристик впрыскивания топлива для повышения ресурса дизелей и их ТА путем разработки принципов и методов кардинального повышения долговечности и безотказности стальных точных и прецизионных ПТ ТА дизелей, работающих преимущественно в дизельном топливе (ДТ).

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие основные задачи:

анализ типичных дефектов ТА транспортных дизелей, лимитирующих стабильность характеристик впрыскивания ДТ во времени, и их связи с явлениями трения, износа и повреждаемости;

диагностирование новых и дефектных ПТ ТА с использованием современных методов экспериментальной физики для выявления процессов, ответственных за возникновение повреждаемости;

экспериментальное определение триботехнических свойств ДТ и бензинов в сопоставлении с керосинами и маслами;

оценка целесообразности кардинального изменения конструкции ПТ ТА для исключения их систематических дефектов;

разработка математической модели и программы для ЭВМ с целью осуществления оптимизационных вычислительных исследований в направлении одновременного ограничения нагруженности ПТ ТА и обеспечения оптимальных исходных характеристик впрыскивания топлива;

постановка широкого спектра экспериментов на машинах трения по исследованию возможности саморегулирования трибопроцессов на рабочих поверхностях стальных высокоточных высокотвердых и низкошероховатых ПТ в среде ДТ с минимизацией износа при этом, по определению диапазона и уровня таких режимов, а также по изысканию методов расширения диапазонов и кардинального снижения уровня изнашиваемости на основе новейших представлений физико-химии и триботехники;

разработка физико-химической модели развития повреждаемости высокоточных стальных ПТ ТА, работающих преимущественно в ДТ, и методического комплекса (блок-схемы) проведения исследований, направленных на обеспечение кардинального повышения долговечности различных конкретных стальных высокоточных ПТ ТА;

разработка комплекса мероприятий в направлении увеличения долговечности и безотказности типичных стальных точных и прецизионных ПТ с учетом характера производства ТА.

Научная новизна. Впервые доказана возможность стабилизации характеристик ТА посредством воздействия на механизмы изнашивания ее ПТ. При этом выявлены ведущие процессы, ответственные за повреждаемость стальных высокоточных ПТ, работающих преимущественно в ДТ, различные даже в пределах одной (прецизионной) поверхности. Впервые разработаны единая комплексная математическая модель параметрической оптимизации (ЕКМПО) и программа ЭВМ на ее основе, позволяющие вести вычислительные исследования более 23000 конструктивных вариантов ТА при впрыске в полость цилиндра с переменным газовым противодавлением, оценивать их достоинства также и по параметрам струй топлива и учитывать при этом деформацию втулки плунжера, влияние износа прецизионных поверхностей на параметры впрыскивания и ряд других новых факторов. Впервые разработана беспрецизионная клапанная форсунка, свободная от ряда дефектов прецизионной - игольчатой. Впервые дана количественная оценка триботехнических свойств ДТ и бензинов, отработан метод сопоставления их свойств с подобными свойствами масел. Впервые разработаны принципы комплексной оптимизации ПТ ТА и методы кардинального снижения изнашиваемости стальных высокоточных ПТ в среде ДТ путем организации автоколебательных обменных механизмов взаимодействия присадок к ДТ и поверхностей ПТ. Новизна и научно-технический уровень разработок настоящей работы подтверждены авторскими свидетельствами на изобретения и тремя серебряными медалями ВДНХ 1984, 1986 и 1988 гг.

Практическая значимость и реализация. Основные научные положения и методики вычислительных и экспериментальных исследований работы позволили автору выявить причины нестабильности и возникновения дефектов ТА автомобильных, тракторных и тепловозных дизелей и дать конкретные рекомендации с комплексом конструктивных, технологических и эксплуатационных мероприятий. Рекомендации и разработки переданы ряду заводов. Часть предложений и разработок внедрена. Так, на ЗИМе (г. Харьков) внедрена беспрецизионная клапанная форсунка, что способствовало и внедрению нового форсированного дизеля, там же внедрена ст. 30ХЗФМСА, разработанная во ВНИИстали и исследованная автором, взамен ст. ШХ-15, что позволило резко уменьшить число зависаний плунжеров. На ЯЗДА (г. Ярославль) внедрен комплекс совместных мероприятий

по паре ось-втулка толкателя насоса, что позволило заводу устранить схватывание этой пары и выйти на следующий уровень производительности ТА и форсировки дизелей КамаЗ. ЕКМПО внедрена на БМЗ (г. Брянск) и использована при решении проблем ТА заводов ЗИМ и ЛЭДА. Исследования автором действия специальных присадок к ДТ, обеспечивающих обменный характер их взаимодействия с поверхностями стальных пар, позволят начать подготовку серийного выпуска таких присадок в химической промышленности.

Разработанные принципы и практическая последовательность осуществления комплексной оптимизации стальных ПТ и кардинального снижения их изнашиваемости, опробованные на ПТ ТА, работающих преимущественно в ДТ, могут быть применены и для повышения долговечности стальных ПТ другого назначения, работающих в других средах. Материалы работы использованы также в учебном процессе МИИ.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку более чем на 25 научно-технических конференциях и семинарах. В их числе: Международная научная конференция "Трение, износ и смазочные материалы" Ташкент, 1985; научная конференция стран СЭВ "Ремдеталь-88", Пятигорск, 1988; всесоюзные конференции: "Проблемы автоматизации разработки двигателей", Коломна, 1978; "Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом", Харьков, ХПИ, 1979; "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении", М., МВТУ, 1980; "Современные вопросы механики и технологии машиностроения", М., ВДНХ, 1986; "Проблемы совершенствования рабочих процессов в ДВС", М., МАДИ, 1986; "Конструкторско-технологическая информатика, автоматизированное создание машин и технологии", М., Станкин, 1987; "Перспективы развития комбинированных ДВС", М., МВТУ, 1987; 42-я научная конференция МАДИ, М., 1984; конференции общества "Знание", посвященные вопросам трения, изнашиваемости, самоорганизации трибосистем, управлению изнашиванием, Киев, 1978, 1983, 1984, 1985, 1986 (две); 3-я и 4-я московские научные конференции "Триботехника - машиностроению", 1987 и 1989 гг.; всесоюзные семинары "Трение, изнашивание, применение износостойких материалов в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении", Чехов, 1979; "Исследование двигателей сельскохозяйственных машин в динамических режимах", Казань, 1983;

по автоматическому регулированию теплоэнергетических установок, М., МВТУ, 1984, 1986 и 1987, Минск, БПИ, 1988; по комбинированным двигателям. М., МВТУ, 1987 (два).

Публикации. По результатам выполненных исследований и работ опубликовано 70 печатных работ, в том числе 4 книги, 36 статей, а также получено 11 авторских свидетельств на изобретения.

Объем и структура. Работа состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Она изложена на 286 страницах машинописного текста, включает также (без приложений) 82 таблиц, 62 рисунка и список литературы с 288 наименованиями. Приложения на 174 страницах содержат информацию по некоторым специальным вопросам, тексты рекомендаций промышленным предприятиям по конкретным проблемам и другие материалы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I посвящена аналитическому обзору типичных дефектов ТА транспортных дизелей, выявлению их связи с явлениями трения, износа и повреждаемости. Даны краткие характеристики ПТ ТА, лимитирующих ее долговечность, и сред трения, в которых они работают, включая качество их фильтрации. На примере привода плунжера и форсунок рассмотрена степень эффективности применения кардинальных конструктивных изменений узлов ТА для устранения дефектов ее ПТ.

Показано, что основными дефектами ТА, получившей наибольшее распространение на транспортных дизелях, являются: ухудшение подвижности игл, разбивание конуса и зависание игл закрытых форсунок, износ прецизионной поверхности плунжерных пар и зависание плунжеров, сильный износ пары нижний торец вращающегося плунжера — опорная пята насоса распределительного типа, схватывание пар неподвижная ось — втулка толкателя V-образного насоса, питтинговое поражение рабочих профилей кулачков, поломки пружин, в первую очередь — плунжерных. Показано далее, что эти дефекты или выводят ТА из строя (зависание игл форсунок и плунжеров, схватывание осей толкателя с их втулками), или приводят к существенному ухудшению параметров впрыскивания топлива. Так, местный износ плунжеров искажает характеристику впрыска, а большой износ торцевой пары плунжера приводит к

резкому запаздыванию начала подачи топлива. И то, и другое резко ухудшает параметры рабочего процесса дизеля - экономичность, токсичность выхлопа и др. Почти все дефекты ТА связаны с нарушениями работы ее ПТ.

Охарактеризованы отличительные черты ПТ ТА и условия их работы. Детали всех перечисленных ПТ изготавливаются из сталей, имеют высокую твердость (около $HRC\ 60$) и малую шероховатость ($R_a\ 0,04\ \mu m$ для прецизионных и $0,32\ \mu m$ для точных поверхностей). Номинальные диаметральные зазоры составляют $1-2\ \mu m$ в прецизионных и $10-40\ \mu m$ в точных парах скольжения. Рабочими средами для прецизионных поверхностей являются ДТ и бензины (реже), для точных ПТ - масла в смеси с топливами, просочившимися по зазорам прецизионных пар. Качество фильтрации топлив - хорошее. Например, на автотракторных дизелях преобладает использование бумажных фильтров, задерживающих до 99,5% механических частиц размером до $1\ \mu m$ и больше. Однако, в отличие от масел, топлива до сих пор в качестве среды трения не рассматривались и никаких требований в ГОСТах или ТУ к ним с этой точки зрения не предъявлялось. В ряде случаев поступление к отдельным частям поверхностей среды трения затруднено.

Длительное время при попытках устранения перечисленных дефектов ТА, в силу отсутствия действенной теории трения, преобладал эмпирический метод проб и ошибок. Так методом подбора остановились на использовании объемно-закаливаемых сталей для прецизионных плунжерных пар ТА (ст. ШХ-15 или ХВГ). В ряде случаев начали использовать азотируемые стали. Но это не устранило выше

перечисленные систематически встречающиеся в настоящее время дефекты ТА, связанные с ее ПТ. В связи с этим автором первоначально осуществлены разработки в направлении исключения из конструкции ПТ, в которых систематически возникали дефекты. Например, на рис. 1 показана замена закрытых прецизионных форсунок клапанными беспрецизионными со сферическим клапаном, открываемым по потоку топлива, с витой цилиндрической или пластинчатой пружиной. Использование первой из беспрецизионных форсунок дало возможность ввести в серийное производство напряженный дизель транспортного назначения с весьма малыми габаритами под форсунки. Вторая, удостоенная в 1984 г. серебряной медали ВДНХ на выставке "Автопром-60", открыла дорогу использованию

таких беспрецизионных форсунок на дизелях с малым наддувом или без него вообще. Она принята к использованию на вновь создаваемом дизеле новейшего типа ПД-ЕЗ-200, как вариант.

Затем выбраны для трибологических исследований 5 типичных "неустранимых" ПТ ТА и типичная малоисследованная среда - ДТ.

Глава 2 посвящена выбору методических подходов к решению основной задачи - обеспечению длительной долговечности стальных высокоскоростных ПТ ТА.

Проблемам трения и повреждаемости, методологическим вопросам оценки надежности систем трения и предельной прочности материалов посвящено большое количество работ отечественных ученых - С.Б. Айбиндера, А.Ф. Аксенова, А.В. Белого, Л.И. Бернадского, Г.С. Бортника, Н.А. Буше, И.А. Буяновского, Г.В. Виноградова, Д.Н. Гаркунова, Н.Б. Демкина, Ю.Н. Дроздова, Ю.А. Евдокимова, В.В. Запорожца, С.М. Захарова, И.И. Карасика, Б.И. Костецкого, И.В. Крагельского, В.Н. Лозовского, Р.М. Матвеевского, Л.Г. Носовского, В.С. Ивановой, А.И. Петрусевича, С.В. Пинегина, А.С. Проникова, М.В. Райко, П.А. Рабиндера, Д.Н. Решетова, Л.Н. Рыбаковой, Э.В. Рыкова, А.П. Семенова, М.М. Хрущева, А.В. Чичинадзе и многих других, а также ряда зарубежных ученых - Г. Бейбли, Ф. Боудена, Д. Тейбора, Г. Флайшера, Г. Хайнике, Х. Чихоса и др.

В главе 2 подчеркнуто, что наиболее продуктивными направлениями являются работы обобщающего плана такие, как обоснование проф. А.С. Проникова обязанности комплексных мероприятий конструктивного, технологического и других направлений для обеспечения надежности ПТ, структурно-энергетическая теория трения и изнашивания проф. Б.И. Костецкого, теория совместимости антифрикционных ПТ проф. Н.А. Буше, а также методические подходы и результаты изучения работы ПТ в тяжелых и экстремальных условиях школой проф. Ю.Н. Дроздова.

Учитывая отмеченные в главе I особенности ПТ ТА, а также размещение в замкнутых объемах нескольких ее ПТ, большее внимание было уделено структурно-энергетической теории трения, а также теории изменения брюссельской школы проф. И. Пригожина и результатам исследований ПТ живой природы под руководством проф. В.Н. Павловой, подтвердивших настоятельную необходимость поисков путей организации авиационных реакций взаимодействий

и в ПТ машиностроения для включения в действие компенсационных возможностей систем трения. Уделено также пристальное внимание исследованиям, проводимым под руководством профессоров А.Ф. Аксенова и В.Н. Лозовского в области ПТ авиации.

На основании рассмотрения современного состояния соответствующих областей науки в главе 2 сформулированы методические подходы к решению основной задачи: необходимо экспериментальное выяснение вопроса, относятся ли высокотвердые, низкошероховатые, высокоточные (с микронными зазорами) ПТ ТА, работающие преимущественно в среде ДТ в ограниченных замкнутых объемах, к открытым системам, возможно ли на их поверхностях явление структурно-энергетической приспособляемости; необходимо экспериментальное определение триботехнических свойств топлив в сопоставлении с маслами; необходимо определить наличие и степень влияния случайных факторов, в частности, вибраций. Необходимо также обеспечить возможность вычислительных исследований ТА еще на стадии проектирования в направлении обеспечения ею требуемых характеристик впрыска топлива при минимальных значениях скоростей движения деталей ПТ и нагрузок на них. Необходимо, наконец, экспериментальное определение рациональности перенесения на ПТ ТА и ДТ традиционных методов улучшения триботехнических свойств обычных ПТ и масел, а также — экспериментальные поисковые работы в направлении выяснения возможности организации упомянутых автоколебательных реакций взаимодействия ДТ с поверхностями ПТ ТА, характерных для открытых систем и ПТ живой природы, что успешно апробировано применительно к смазочным средам Терновой Т.В.

Далее в главе 2 дана краткая информация о конкретно использованных методах экспериментальных исследований. При диагностировании ПТ в их различном состоянии реализован системный подход: проводились металлографический и рентгенографический анализы, исследование субмикрорельефа тончайших поверхностных слоев и их элементный анализ — с помощью сканирующих электронных микроскопов-микроанализаторов (СЭМА) и др. Исследование процессов трения и повреждаемости стальных ПТ осуществлено на машинах трения с различными видами контакта и характера относительного движения, в том числе на машине трения с дополнительным вибрационным нагружением. При этом использовался ряд новейших методов измерений: температуры в зоне контакта с исполь-

зованием тепловизора, работающего в инфракрасном излучении, контактного электросопротивления (КЭС) и др. В ряде случаев снимались электронные спектры поглощения в видимой области ДТ с растворенными в нем веществами, осуществлялся атомно-абсорбционный анализ. Триботехнические свойства ДТ оценивались с помощью показателя "К" проф. А.Ф. Аксенова и с использованием КЭС.

Проблеме создания математических моделей процесса подачи топлива, а также программ на их основе посвящены работы многих исследователей - И.В. Астахова, Д.Н. Вырубова, Л.Н. Голубкова, А.И. Исаева, Г.Г. Калиша, Н.И. Костыгова, В.И. Крутова, Т.Ф. Кузнецова, О.Б. Леонова, А.С. Лышевского, В.Я. Натансона, Б.В. Павлова, Б.П. Пугачева, С.Г. Роганова, В.А. Трусова, Ю.Я. Фомина и др. Но большие потери времени на создание математической модели для каждого нового конструктивного варианта ТА, недостаточная эффективность полученных методом ограниченного перебора результатов привели к определенной дискредитации расчетов процесса впрыска с использованием ЭВМ. Выход из создававшегося положения - в принципиально новом подходе к этой проблеме. Таким подходом и явились разработка автором и практическое использование комплексной математической модели впрыска и распыливания (КММВР) для ряда конструктивных вариантов ТА, характерных для транспортных дизелей, а также математических методов оптимизации сложных моделей.

Разработанная автором КММВР и программа для ЭВМ охватывают 29 вариантов конструктивных решений (путем задания их в исходных данных условными знаками) четырех основных узлов ТА - кулачков, плунжерных пар, нагнетательных клапанов, клапанов форсунок, что дает 23751 вариант ее комплектования. КММВР и составленная на ее основе программа для ЭВМ позволяют без их кардинальной переделки включать, при необходимости, математическое описание новых конструктивных решений узлов.

В КММВР учитываются новые, ранее не учитываемые физические факторы, в частности, влияние переменного противодавления газов в цилиндре двигателя; радиальной циклической деформации гильзы плунжера под воздействием давления в надплунжерном пространстве; гидродинамических явлений в герметизированной надигольчатой полости "закрытой" форсунки; гидродинамического воздействия потока топлива на клапаны, stems и сопротивления потока движению

клапанов в нем. Учитываются также гидравлическое сопротивление ТВД и рассчитывается объем газов, которые могут попадать в распылитель в конце процесса впрыска. В КММВР, кроме того, уточнены также методы учета ряда факторов, в том числе зависимости коэффициентов расхода через переменные проходные сечения клапанов от хода клапана и перепада давления; зависимости плотности, вязкости и коэффициента сжимаемости топлив (ДТ, бензины) от давления и температуры и др. Построение математической модели и программы для ЭВМ позволяет в каждом конкретном случае получить численные характеристики влияния того или иного физического фактора или способа его учета, а также включать учет новых факторов.

В КММВР дифференциальные уравнения граничных условий решаются с использованием метода конечных разностей и итеративного метода Вегстеина, свободного от всяких ограничений по протеканию производных и обеспечивающего ускоренную проходимость решений, их системы - с использованием модифицированного метода Зейделя. Уравнения неустановившегося движения реальной сжимаемой жидкости в ТВД в КММВР могут решаться двояко - как с учетом протекания процессов только в концевых объемах трубопровода, так и по всей его длине. В первом случае за основу принят подход Т.Ф.Кузнецова, но с рядом уточнений.

Известные классические математические методы оптимизации применить в случае ТА не удастся, так как они требуют явной аналитической зависимости критерия оптимальности и технических ограничений (характеристик впрыскивания и распыливания) от варьируемых параметров (размеров конструктивных элементов ТА). Поэтому для обеспечения параметрической оптимизации была осуществлена привязка КММВР к модели градиентно-статистического метода оптимизации, разработанного Мирошниковым В.В. Тем самым совместно с ним на основе КММВР была создана единая комплексная модель параметрической оптимизации (ЕКМПО) ТА с кулачковым приводом, включающая 21 подпрограмму (см. табл. I), позволяющая осуществить либо только поиск области выполнения всей совокупности технических ограничений (требований) на параметры впрыска и распыливания ("конструктивный" расчет), либо еще и поиск экстремума критерия оптимальности одной из характеристик впрыска в зоне уже обеспеченных технических ограничений (собственно параметрическую оптимизацию). "Конструктивный расчет" - см. рис.2.

Последовательность проведения параметрической оптимизации такова. Выбирается конструктивный вариант ТА. Для него подготавливаются исходные данные, которые состоят из двух частей - для КММВР и для ЕКМПО. Первые включают размеры конструктивных элементов линии высокого давления ТА и цилиндро-поршневой группы дизеля, параметры топлива и газов, а также условные обозначения, характеризующие конструкцию отдельных узлов выбранного варианта и назначенные условия ведения расчета (около 300 наименований). Вторые в основном представляют собой условия и обстоятельства, позволяющие использовать ЕКМПО в полном или частичном объеме.

Из числа исходных данных для КММВР выбираются конструктивные размеры элементов ТА (варьируемые параметры), за счет подбора которых предполагается обеспечить комплекс технических ограничений и найти экстремум критерия оптимальности (число одновременно варьируемых параметров достигает 15).

Уже в процессе вычислений автоматически получают системы линейных или квадратичных (в соответствии с заданием) уравнений регрессии, т.е. зависимости выбранных технических ограничений и критерия оптимальности от варьируемых параметров и, в соответствии с исходными данными, автоматически осуществляют поиск либо только зоны выполнения всех технических ограничений, либо и экстремума критерия оптимальности.

ЕКМПО и программа позволяют без остановки счета провести необходимое исследование устойчивости полученного решения, т.е. выяснить, в какой мере могут искажаться характеристики технических ограничений при изменении найденных оптимальных значений варьируемых параметров (за счет, например, влияния допусков или зольности сорта топлива).

Глава 3 посвящена результатам диагностирования типичных стальных высокоточных ПТ ТА - носителей наиболее частых дефектов. Его цель - выявление основных процессов, развивающихся на рабочих поверхностях этих специфических ПТ.

Исследования прецизионных плунжерных пар показало, что наиболее часто повышенный износ плунжера встречается в зоне головки плунжера со стороны, противоположной рабочей отсечной спирали, т.е. в той зоне, где воздействие максимальных прижимающих усилий накладывается на воздействие максимальной скорости. На

нормально работавших участках прецизионной поверхности зафиксировано наличие тонких ориентированных по направлению движения слоев, несмотря на высокую твердость поверхностей. Содержание кремния — одного из элементов внешнего абразива — в изношенной, нормально работавшей части поверхности и в глубине объема деталей оказалось практически одинаковым, т.е. не внешний абразив является основной причиной повышенного износа. В то же время в тончайших поверхностных слоях сильно изношенных участков всегда имеется повышенное количество кислорода (рис. 3). Зафиксированы и моменты срыва твердых частиц вторичных структур трения (ВС) с заостренной прецизионной поверхности, "работавших" затем в качестве внутреннего абразива (рис. 4). Зависание плунжеров, т.е. их схватывание со втулками, чаще происходит в средней по длине части прецизионной поверхности. В этих зонах обнаружено проявление термических процессов — образование отбеленных мелкозернистых мартенсито-аустенитных слоев $\delta\text{-Fe}$ с твердостью, выше исходной, на поверхности и отпущенных слоев с пониженной твердостью на глубине до 0,2 мм. Повышения содержания кислорода на участках, близких к зоне схватывания, но не имеющих следов выраженного износа, не обнаружено.

Схватывание ПТ неподвижная ось — втулка толкателя, возникающее при форсировании ТА, происходит всегда с одной стороны по длине последней — вследствие перекоса деталей ПТ, приводящего к резкому — до 30-кратного — возрастанию нагрузок, т.е. до уровня нагружения, вызывающего не только разрушение пленок среды и слоев ВС, но и деструкцию любого материала.

Исследования установили также, что до 40% ПТ нижний торец вращающегося плунжера — опорная пятка превращены в пары резания из-за наличия на торце пятки твердых рисок, образующихся при выводе подторцовочного резца при финишной операции обработки.

Таким образом, диагностирование ряда типичных высокоточных слабошероховатых высокотвердых стальных ПТ ТА выявило ряд важных обстоятельств — возникновение на их твердых поверхностях ориентированных слоев ВС; существенную и неоднозначную роль кислорода; ответственность за их повреждаемость классических процессов при трении и др., т.е. соответствие этих весьма своеобразных ПТ наиболее современным представлениям об общих закономерностях трения и изнашивания. Но выявлены и новые фак-

ты, в первую очередь, образование собственного внутреннего абразива на прецизионных поверхностях, нейтрализующего положительное влияние тех методов поверхностного упрочнения, которые направлены на повышение твердости поверхностных слоев, типа азотирования и др. Проведенное диагностирование позволило разработать обобщенную физико-химическую модель трения и изнашивания стальных высокоскоростных ПТ ТА, работающих в ДТ, которая и описана далее в главе 3. Кратко суть ее заключается в следующем (на примере окисных ВС в связи с обнаружением в наиболее изношенных зонах резкого увеличения содержания кислорода). Еще на стадии финишных операций обработки на будущих поверхностях трения образуются первоначальные ВС (участок 2 на рис. 5). На прецизионных поверхностях это ВС I типа - твердые растворы активных элементов внешней среды, в первую очередь кислорода, в металле детали (внешне - блестящий вид); на точных поверхностях, шлифуемых с большими скоростями резания, чаще ВС II типа - химические соединения активных элементов внешней среды с металлом детали (внешне - матовый оттенок). ВС второго типа более тверды, но и более хрупки, чем ВС первого типа. В рабочих условиях первичные ВС, участвуя в трении, разрушаются, а на их месте появляются новые ВС в результате взаимодействия материалов деталей пары с рабочей средой - ДТ или его смесью с маслами. При этом опять происходит диффузия ряда активных элементов среды в поверхностные слои деталей, прежде всего кислорода (участок 3). Вследствие того, что разные участки поверхностей деталей ТА контактируют в силу особенностей рабочего процесса ТА при разных нагрузках и скоростях скольжения, возобновление ВС на них протекает по-разному. В частности, при избытке среды трения на участках, подвергающихся воздействию увеличивающихся скоростей, а затем и ударному приложению больших нагрузок, создаются многослойные ВС, на границах которых из-за различия физических свойств этих ВС возникают дополнительные напряжения, способствующие их последующему отслаиванию и отделению (верхняя часть участка 4, рис. 5 и 4). Такими зонами являются, в частности, участки прецизионных поверхностей плунжера в районе его головки. Там, где ощущается недостаток среды трения, исходные ВС разрушаются быстрее, чем восстанавливаются, происходит контактирование ювенильных участков. Поскольку, как правило, обе детали изготавливаются из од-

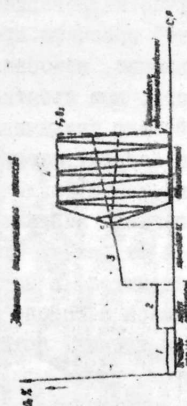


Рис. 5. Эволюция окислительных процессов на прецизионных и точных поверхностях стальных пар трения толковой аппаратуры

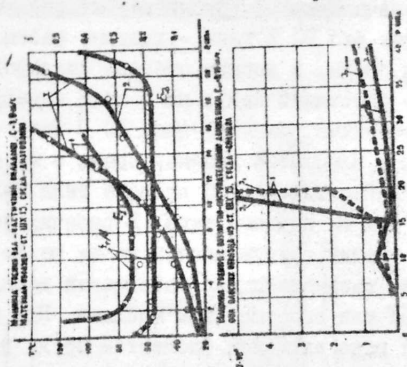


Рис. 6. Влияние создания развитого субмикрореельфа (кривые 2) на остаточной прочности на износ (3) и коэффициент трения (4) или (5)

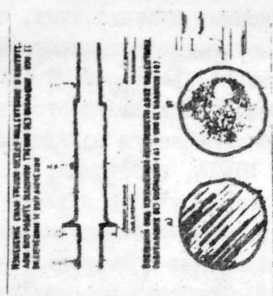


Рис. 7. Влияние лонгитудинальной вибрации на износ

ной и той же стали, это приводит к возникновению металлических связей поверхностей обеих деталей в период "выстоя". Но возобновляющимся относительным движением деталей вновь возникшие связи нарушаются, в результате чего происходит местное точечное повышение температуры, местный отпуск и последующая вторичная закалка с образованием отбеленных слоев на этапе последующего "выстоя" плунжера, а в конечном счете - схватывание деталей второго рода (горячий задир), нижняя часть участка 4 (рис.5). Именно так развиваются процессы в средней части прецизионных поверхностей плунжерных пар

в нижней части неподвижных осей толкателей, изготавливаемых из объемно-закаливаемых сталей. При использовании азотируемой стали аналогичный процесс не приводит к схватыванию деталей благодаря существенно большей теплоустойчивости самой стали за счет наличия в ней повышенного содержания хрома и введения молибдена, "страдающим" становится топливо, которое коксует. Но при этом, несмотря на разложение топлива, никогда не проявлялись признаки водородного или даже просто повышенного износа в этой зоне. Таким образом, в ПТ ТА ведущими процессами, ответственными за повышенный износ и схватывание на различных участках их поверхностей, является либо ме-
M 498644
ханохимическая форма абразивного износа с созданием абразива внутри ПТ из отслаивающихся твердых ВС второго типа, либо схватывание второго рода. Причем после типичной бифуркационной точки Б (рис.5) возможно развитие процессов трения по одному из трех направлений - двум упомянутым и по пути сохранения устойчивых ме-
ханохимических процессов (средняя линия на участке 4). Причем "выбор" направления может происходить под воздействием любых случайных факторов, таких, как изменение содержания кислорода в топливе, различная степень деформаций или взаимного выкашивания деталей пар, различное качество процессов термообработки (различное содержание остаточного аустенита в стали).

Далее в главе 3 подчеркивается, что рассмотрение модели свидетельствует о необходимости нейтрализации крайних проявлений влияния кислорода. Обнаружение же в зонах повреждаемости ПТ ТА результатов действия тепловых потоков и потоков веществ из сред трения в поверхности трения и продуктов деструкции ВС - в среде свидетельствует о возможности отнесения этих ПТ к открытым системам лишь условно - отсутствует полноценный обмен веществами.



В главе 4 приведены новые результаты разносторонних исследований на машинах трения применительно к специфике ПТ ТА и сред, в которых они работают.

При проведении экспериментов на машинах трения типа вал - частичный вкладыш с обоими стальными образцами без их предварительной приработки в различных средах, в том числе и в дизельном топливе (ДТ), получены зависимости изменения коэффициента трения (рис.6), и интенсивности изнашивания от нагрузки, по своему характеру очень близкие к графику общей закономерности структурно-энергетической теории трения. На них четко просматриваются две бифуркационные точки перехода от неустановившихся режимов приработки (легкие ниспадающие ветви кривых μ , рис.6) в зону самоорганизации - устойчивых механохимических процессов трения с минимальными и стабильными значениями триботехнических параметров на более высоком энергетическом уровне (при больших давлениях на контакте), а также от этих режимов - к режимам повреждения (точки "Б"). Те же эксперименты при осуществлении измерения температуры поверхности с помощью тепловизора в инфракрасном излучении выявили в зоне трения наличие мощного теплового потока, особенно при переходе к повреждаемости. Как следует из данных рис.6 (кривая T_1), уже при давлении 16 МПа на контакте температура поверхности достигает 135°C, а градиент ее роста - 16 град/МПа. Если он и не увеличится при дальнейшем росте нагрузки, то при давлениях, близких к рабочим для натурных деталей ПТ ТА, например, 50-60 МПа для плунжерных пар, температура поверхности может достичь уровня фазовых превращений, которые и были обнаружены при заклинивании плунжеров.

Это обстоятельство является важным дополнительным подтверждением приближения ПТ ТА, имеющих малые зазоры и работающих в замкнутых объемах, к открытым системам, обменивающимся со средой веществом и энергией.

Цикл экспериментов по определению триботехнических свойств нескольких сортов ДТ и бензинов на приборах КИИПА в условиях качения и одностороннего или реверсивного скольжения при исходном точечном и линейном контакте показал, что показатель "К" проф. А.Ф. Аксенова для ДТ разных сортов (298-436%) несколько превышает такой показатель лучших реактивных топлив (керосинов). Введение реверса заметно повышает износ, особенно в бензинах, но одновременно заметно повышает и противозадир-

ные свойства и бензинов, и, особенно, ДТ. Первое ^{можно} объяснить 2-кратным прохождением образцов через зону неустановившихся режимов трения на каждом рабочем цикле, второе - прерыванием накопления дислокаций при прекращении относительного движения дважды на каждом цикле.

Однако, сопоставить триботехнические свойства ДТ с маслами удалось только путем измерения контактного электросопротивления (КЭС) стальных ПТ на обычных машинах трения. Как показали эти эксперименты, ДТ имеет в среднем в 300 раз более низкие триботехнические свойства по сравнению с маслами (в диапазоне установившихся механохимических процессов): КЭС составляет всего 15-30 Ом против $(6-8) \cdot 10^3$ Ом в среде масел, что достигается образованием сложных ВС с участием *S, P, Cl* и других элементов, содержащихся в присадках к маслам.

Для дизелей характерно наличие вибраций вследствие взрывного характера рабочего процесса, неполной уравновешенности его движущихся масс и т.п. Но сведения об их влиянии на изнашиваемость стальных ПТ полностью отсутствуют. Поэтому было проведено экспериментальное определение степени влияния дополнительных вибрационных нагрузок на изнашиваемость стальных ПТ в среде ДТ. Введение вибрационной нагрузки с частотой 50 Гц при экспериментах на одной из специализированных машин трения повысило давление на контакте по сравнению с основной статической нагрузкой всего на 3%, но вызвало увеличение изношенного объема сферического индентора при работе в среде ДТ - в 2,66 раза. В условиях такой вибрации сильнее проявились и свойства среды трения - замена масла на ДТ в случае пары "ШХ-15 по ШХ-15" привела к увеличению изношенного объема при наличии вибрации в 1,86 раза против 1,26 при ее отсутствии. Существенно меняется кинетика процессов на контакте при возникновении и снятии вибрации. После включения вибрации сила трения на контакте работающей ПТ мгновенно и резко - более чем вдвое - возрастает (рис.7). Затем она быстро снижается и стабилизируется на уровне, более высоком, чем при отсутствии вибрации. При снятии вибрации после ее относительного кратковременного действия сила трения уменьшается ^{ниже} уровня, имевшего место до включения вибрации. Последнее ^{можно} объяснить возникновением в период приложения вибрации микроточечных кратеров на поверхности (рис.7), удержива-

ких ДТ. Полученные результаты свидетельствуют о большом влиянии вибрации и дают основание считать, что ею и при движении одной из деталей ПТ вызывается явление, близкое к фреттинг-процессу.

Далее в главе 4 сформулированы направления дальнейших исследований на машинах трения, вытекающие из полученных экспериментальных результатов:

применения методов повышения триботехнических свойств масел к ДТ и вытекающих из этого последствий;

применения технологических методов упрочнения поверхностей, рекомендуемых для обычных ПТ, и для случая стальных высокоскоростных ПТ, работающих в среде ДТ, включая и ряд нетрадиционных;

использования нового решения проблемы износостойкости трибосистем, разработанного Терновой Т.В., основанного на новых обменных, автоколебательных явлениях.

Первое направление реализовано введением в ДТ беру - и фосфорсодержащей присадки. Добавление к ДТ 3% этой присадки привело к возрастанию КЭС до 7500 См, т.е. до уровня хороших масел и при больших нагрузках. Эксперименты на МТ вал-втулка подтвердили эффективность этой присадки в среде ДТ при $p = 23$ МПа и $C = 0,26$ м/с - интенсивность изнашивания стального валика уменьшилась в 9 раз, стальной втулки - в 2 раза. Заметный эффект оценивается как результат взаимодействия активных элементов присадки, в первую очередь, серы, с элементами стали, а также с растворенным в ДТ кислородом. В первом случае возникают сульфиды, играющие, судя по литературным данным, роль твердой смазки. Во втором - окислы серы, которые легче образуются, чем окислы железа, аккумулируют большее количество кислорода, и этим в определенной степени затрудняют образование последних и замедляют окислительные процессы на контакте. Однако, добавку серу - и фосфорсодержащих присадок в ДТ, в отличие от масел, рекомендовать нельзя, так как ДТ сжигается, активные элементы идут в отработавшие газы, повышая их токсичность, а для обеспечения новых партий ДТ присадками нужны слишком большие мощности для их производства. Но положительное влияние серусодержащих присадок к ДТ, а также выявленное экспериментально произвольное внедрение серы в прецизионную поверхность плунжера из масла дали толчок проведению экспериментов со сталью типа ШХ-15, в которую осуществлено

предварительное введение повышенного содержания серы при ее выплавке.

Эксперименты с увеличенным содержанием S и P во всем объеме самой стали в тех количествах, которые уже дают положительный эффект по износостойкости, но еще не должны приводить к понижению объемной прочности стали, показали, что интенсивность изнашивания в среде ДТ неподвижных образцов с повышенным содержанием серы и фосфора при ступенчатом повышении давления и достижении им величины в 30 МПа снижается в 73 раза, а сопрягаемого образца из обычной стали ШХ-15 - в 7,5 раза. При длительных экспериментах на той же МТ при давлении 40 МПа снижение средней интенсивности изнашивания деталей такой же ПТ составило соответственно - в 6,33 и 4,55 раза. Т.е. эффективность введения серы и фосфора в сталь оказалась выше, чем введение серо- и фосфорсодержащей присадки в ДТ. Этому, видимо, способствует, судя по литературным данным, явление резко выраженной реактивной диффузии любых легирующих элементов из глубинных слоев деталей к поверхности трения. Наверное, этим объясняется тот факт, что многие зарубежные фирмы, производящие ТА и подшипники качения используют именно такую сталь без энергоемких операций поверхностного упрочнения. Подбор режима поверхностного сульфидирования электролитноплазменным методом обеспечил аналогичные результаты при кратковременных экспериментах со ступенчатого повышающимися нагрузками. Однако, получаемый эффект терялся при относительно длительных испытаниях уже на МТ в результате быстрого и полного износа "рыхлого" сульфидированного слоя.

Цикл экспериментов с исследованием ряда технологических методов поверхностного упрочнения, известных и нетрадиционных, применительно к объемно-закаливаемой стали ШХ-15 был осуществлен первоначально в средах с более высокими триботехническими свойствами - в маслах и смазках, наиболее в комплексе перспективные из них затем исследовались в среде ДТ. В экспериментах использованы следующие известные методы: низкотемпературная нитроцементация, лазерное упрочнение, диффузионные процессы хромирования, барирования, силицирования, покрытия КИХ (конденсация с ионной бомбардировкой на основе нитридов молибдена, хрома, титана), а также новые или не получившие пока широкого распространения методы азотирования в тлеющем разряде (АТР) и ион-

ной обработки азотной плазмой (ионная имплантация, ИИ). В двух предварительных циклах испытаний на различных типах машин трения наилучшие результаты показали ДХ и КИБ (на основе нитридов титана и хрома). Так, на машине трения с односторонним скольжением при $C = 1,3$ м/с достигнуто снижение интенсивности изнашивания неподвижного образца соответственно в 5,26 и 10 раз. Подчеркивается, что ^{это} технологические процессы, которые помимо повышения твердости существенно повышают и антикоррозионную стойкость поверхностей. Т.е. и в этом случае замедление возникновения на поверхностях окисных ВС с низкими триботехническими свойствами является одной из важнейших причин достигнутого снижения износа. Однако, оба эти процесса не свободны от побочных явлений. Так, ДХ осуществляется только при температурах, превышающих 1000°C , что приводит к отжигу деталей и потере ими объемной прочности. При реализации ДХ в твердой среде он очень трудоемок и результаты его использования не стабильны. В случае парофазного варианта ДХ требуется глубокий вакуум, как и в случае КИБ (10^{-5} - 10^{-3} мм рт.ст.). В массовом производстве обеспечение такого вакуума для вращающихся деталей и равномерного слоя нитрида представляют определенные технические сложности. Кроме того, при работе с КИБ обнаружены вспышки лавинообразного возникновения износа и схватывания деталей в случае попадания в зону трения внешнего твердого абразива. Поэтому эти два метода в среде ДТ не исследовались. Третье и четвертое места в обоих циклах испытания по эффективности поделили ИИА и АТР, процессы близкие. Но АТР осуществляется при умеренном вакууме ($2-0,5$ мм рт.ст.) и "умеренных" температурах ($520-580^{\circ}\text{C}$), что делает его более приемлемым. Было исследовано 9 режимов АТР применительно к закаленным образцам из ст. ШХ-15 в среде ДТ. Результаты отрицательны: при нагрузках выше 20 МПа происходило резкое возрастание износа образцов из-за срыва с поверхности в среде ДТ твердых и хрупких частиц нитридных фаз, начинающих работать в качестве внутреннего приобретенного абразива. В конечном счете исследования технологических методов упрочнения закаленной ст. ШХ-15 показало, что среди опробованных методов не оказалось ни одного, который мог бы соперничать с методом повышения содержания серы и фосфора в объеме стали и не требовал бы при своем использовании серьезного усложнения технологии, повышения потребления

энергии и общей трудоемкости изготовления стальных высокоточных ПТ, или не вызывал побочных негативных явлений. Эксперименты на машинах трения показали также, что введение в сталь легирующих элементов, повышающих термостойкость сталей (Сг, V, Мо и др.), улучшает все их триботехнические характеристики, в частности, их задиристость. При этом выявилась целесообразность легирования большим числом элементов, но с использованием меньшего количества каждого. Так, для прецизионных плунжерных пар азотируемая сталь 30Х3МФА оказалась предпочтительнее азотируемой стали 25Х5М и калящейся стали ШХ-15 (без увеличенного содержания в ней серы) по задиру- и износостойкости.

В главе 4 подчеркивается, что даже лучшие из прошедших экспериментальное исследование методов легирования ДТ или деталей ПТ во всем их объеме или только их поверхностных слоев дали не устранение изнашивания, а лишь его снижение, так как они не меняют механизм взаимодействия среды трения и рабочих поверхностей деталей ПТ.

Плодотворным оказалось введение в небольшом количестве (0,5%) в ДТ специально синтезированных к.х.н. Терновой Т.В. по просьбе автора растворимых в ДТ металлосодержащих соединений МД. Интенсивность изнашивания стальных подвижных и неподвижных образцов при длительных испытаниях снизилась соответственно в 10 и 70 раз даже с учетом выпавших экспериментальных точек.

При этом экспериментально обнаружено периодическое уменьшение и увеличение количества металла присадки МД в ДТ, что означает его попадание в поверхностные слои деталей ПТ и их микролегирование этим металлом непосредственно в процессе трения. Одновременно зафиксировано соответствующее увеличение и уменьшение содержания железа в ДТ. В совокупности это означает возникновение автоколебательного обмена металлом присадку к ДТ и железом деталей ПТ (рис. 8), как и в типичных открытых системах. Таким образом найдено, наконец, и для высокоточных стальных ПТ, работающих в среде ДТ в замкнутых объемах, практическое обеспечение перехода, предсказанного теорией изменения проф. И. Пригожина для открытых систем, от произвольных потоков веществ и энергии, сопровождающихся разрушением структур материи, к упорядоченному автоколебательному обмену веществом, при котором возникают неразрушающиеся структуры. Для "включения" таких обменных про-

цессов необходим определенный энергетический уровень, но его верхний предел не ограничен, что важно практически, так как гарантирует эффективность этого направления при переменных скоростях и нагрузках, характерных для ПТ ТА, а также при возникновении случайных дополнительных нагрузок типа вибрационных.

В главе 4 показано также, что эффективным методом удержания ДТ для устранения его дефицита в средней части прецизионных поверхностей оказалась операция создания на прецизионной поверхности плунжера или шлифованной поверхности оси толкателя развитого субмикрорельефа (типа морозных узоров) химическим способом при комнатной температуре - травлением готовых деталей в слабом спиртовом растворе одной из кислот. Это подтверждено исследованиями на различных машинах трения и в различных средах (рис. 6). При этом даже в обычном ДТ коэффициент трения снижается от 0,26 до 0,17, диапазон нормальных механохимических процессов расширяется вдвое, температура на контакте при давлении 16 МПа падает от 135 до 75°C.

В главе 5 показано, что расчетные исследования параметров впрыска с использованием КММВР и программы для ЭВМ позволяют получить более корректные и взаимосвязанные данные по сравнению со стандартным экспериментом, а также осуществить их более глубокий анализ. Так, экспериментальная кривая зависимости давления $P'_{\text{ф}}$ перед распыливающими отверстиями от угла поворота кулачкового валика ТА дизеля промышленного трактора в меньшей степени (погрешность - 12,6%) соответствовала замеренной среднестатистической величине цикловой подачи топлива, в отличие от полного соответствия расчетных параметров. Только расчетное исследование позволило выявить причину повышенного расхода топлива на двигателе при различной регулировке - наличие подвпрыска, который в эксперименте не обнаруживался. Расчетные исследования позволяют получить и ряд недоступных определению в эксперименте на двигателе параметров, например, параметров развитых негорящих струй τ , их длин - по методике МАДИ (рис. 9), концентрационных полей по Болдыреву, параметров суммарных кривых распыливания по В.А. Кутовому и т.п. Использование расчетных исследований на основе ЕКМПО и соответствующей программы для ЭВМ позволяет еще на стадии проектирования определить размеры тех конструктивных элементов ТА, которые обеспечат получение требуемых характерис-

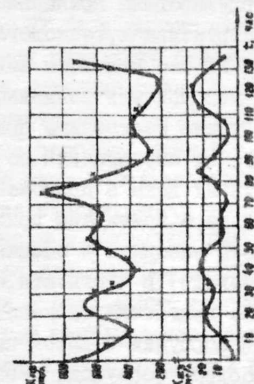
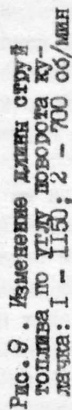


Рис. 8. Изменение во времени концентрации введенного в дт вещества Mn и об-разовавшегося Mn (FeD)

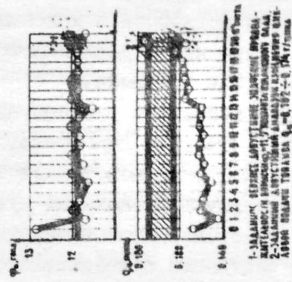


Рис. 10. Изменение цикловой мощности топлива и ее продолжительности в ходе "конструктивного" расчета

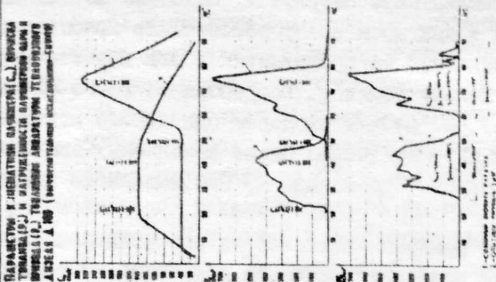


Рис. 11. Изменение скорости роста плуцера, джаминг-випска и в подлунг-ном пространстве по углу поворота кулачка

тик впрыска и распыливания. На рис. Ю показана последовательность приближения к одновременному обеспечению требований по техническому ограничению на продолжительность впрыска и жесткие пределы цикловой подачи топлива. Потребовался всего 21 шаг по методике ЕКМПО, т.е. 21 расчет процесса одинарного впрыска при последовательно в автоматическом цикле изменяемых значениях 15 варьируемых параметров. Это заняло 45 мин. машинного времени ЭВМ БЭСМ-6.

Подтверждена реальная возможность расчетными исследованиями находить такие сочетания размеров конструктивных элементов, которые при обеспечении требований по характеристикам впрыска или их улучшении позволяют ограничить относительные скорости и удельные нагрузки на ПТ ТА. На рис. II показан закон изменения скорости движения плунжера для ТА тепловозного дизеля, при котором устраняется подвпрыск, а максимальные значения скорости относительного движения и давления под плунжером снижаются соответственно в 1,9 и 1,6 раза.

В главе 6 приведена разработанная на основании проведенных исследований блок-схема диагностирования и регулирования процессов трения, износа и повреждаемости стальных высокоточных ПТ ТА. На ней показаны шаги, которые нужно делать двигателям для обеспечения требуемой долговечности этих пар и направления таких шагов. В частности, подчеркивается целесообразность использования лабораторного этапа исследований на машинах трения и числительных исследований на ЭВМ.

Далее сформулированы принципиальные цели и направления реализации конструктивных, технологических и эксплуатационных мероприятий (они кратко изложены ниже в разделе выводов), приведены комплексы мероприятий отдельно для класса прецизионных и точных ПТ ТА, а также конкретные примеры таких мероприятий. Комплексы рекомендуемых мероприятий по конкретным проблемам переданы заводам, часть их дана в приложении к работе.

Далее в главе 6 приведены примеры использования результатов данной работы заводами и оценки таких результатов на ВДНХ (3 серебряных медали). В частности, сказано о внедрении в серийное производство двигателя транспортного назначения беспрецизионной клапанной форсунки с витой пружиной, решившей все трибо-технические проблемы форсунок; о внедрении корсетности втулки толкателя насоса ТА автомобильного двигателя; о натуральных испы-

таниях на стендах двигателя трактора промышленного назначения и ТА автомобильного двигателя плунжеров и осей толкателей, на рабочих поверхностях которых создан субмикрорельеф для удержания сред трения - субмикрорельеф в зонах максимальных нагрузок сохраняется до 500 моточасов, т.е. "работает" на одном из самых ответственных этапов эксплуатации ПТ; о натурных испытаниях насосов ТА автомобильного дизеля с заменой протока масла через картер насоса заливкой ДТ с серу- и фосфорсодержащими присадками - за 100 ч. работы на стенде ТА износ осей толкателей сохранился на уровне, имеющемся при использовании масла.

В главе 6 описаны также достигнутые в результате проведенной работы эффекты:

методические, заключающиеся в обеспечении и использовании вычислительных исследований, в использовании современных методов экспериментальной физики и химии, позволивших приблизиться к более глубокому пониманию протекания процессов трения и изнашивания специфических ПТ ТА;

по надежности и долговечности стальных высокоскоростных ПТ ТА, работающих в среде ДТ - выявлен комплекс принципиальных направлений, позволяющих приблизиться к кардинальному повышению их долговечности;

организационные: разработанная схема проведения диагностики и регулирования процессов трения и изнашиваемости ПТ ТА в совокупности с выявленными направлениями обеспечения их длительной долговечности позволяют резко сократить время решения каждой конкретной проблемы по ПТ ТА и другим стальным ПТ;

экономический эффект - как результат действия вышеперечисленных факторов, приводящих к экономии времени при решении проблем, снижению потребного количества запчастей, переборки узлов и т.п. Конкретные цифры, названные заводами, даны в диссертации и выводах;

специальные эффекты - за счет использования разработок применительно к агрегатам техники специального назначения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Исследования показали, что для решения важной народнохозяйственной задачи - обеспечения и сохранения требуемых характеристик впрыскивания топлива путем кардинального повышения долговечности высокоскоростных пар трения (ПТ) топливной аппаратуры (ТА) дизелей необходим системный подход. Для возможности его осуществ-

ления в промышленности в рамках данной работы:

1. Разработана комплексная математическая модель и программа для ЭВМ впрыска и распыливания ТА и единая математическая модель и программа для ЭВМ ее параметрической оптимизации, позволяющие осуществлять вычислительные эксперименты в направлении обеспечения требуемых характеристик впрыска при ограничении максимальных нагрузок и скоростей скольжения деталей ПТ всех известных моделей ТА.,

2. Осуществлено экспериментальное сопоставление триботехнических свойств дизельного топлива (ДТ) и масел благодаря введению в практику исследований измерения контактного электросопротивления; показано, что эти свойства ДТ в среднем в 300 раз хуже, чем у лучших масел.

3. Проведено диагностирование типичных ПТ ТА и широкие эксперименты на машинах трения (МТ) с использованием современных методов экспериментальной физики и химии, которые убедительно показали, что:

узлы ТА, содержащие высокоточные высокотвердые слабощероховатые стальные ПТ, работающие в замкнутых объемах в ДТ и имеющие малые зазоры, приближаются к открытым системам трения - для них характерно внутреннее формирование потоков веществ и тепловой энергии, но в них отсутствуют полноценные обменные процессы;

ПТ ТА, работающие преимущественно в среде ДТ, следуют структурно-энергетической теории трения и изнашивания - при исследованиях на МТ обнаружено наличие зоны самоорганизации (хотя и достаточно узкой) с минимизацией износа на более высоком энергетическом уровне, а также - бифуркационные переходы к повреждаемости;

в процессах трения и изнашиваемости стальных высокотвердых слабощероховатых ПТ ТА, имеющих малые зазоры, также велика роль кислорода - отрицательно действует и его недостаток, и его избыток;

ответственными за повреждаемость стальных ПТ ТА наиболее часто являются механохимическая форма абразивного износа с образованием абразива внутри ПТ - при избытке ДТ и растворенного в нем кислорода - и схватывание второго рода - при недостатке ДТ и кислорода; причем для прецизионных пар характерна возможность проявления обоих процессов на различных участках одной и той же детали;

в возникновении повреждаемости ПТ ТА велика роль случайных факторов таких, как различные уровни: содержания кислорода в ДТ, остаточного аустенита в стали деталей, деформаций и перекоса деталей ПТ, вибраций и т.п.

4. На основании экспериментальных исследований разработана обобщенная модель износа и повреждаемости стальных ПТ ТА и блок-схема осуществления диагностирования их состояния и регулирования процесса трения и изнашивания их поверхностей.

5. Исследования показали, что важнейшими принципиальными направлениями обеспечения кардинального увеличения долговечности и безотказности высокоточных стальных ПТ ТА, помимо устранения преобладающего иногда влияния случайных факторов, должны быть:

снижение интенсивности окислительных процессов на поверхностях трения и процессов образования внутреннего абразива в ПТ;

повышение термостойкости поверхностных оловяных слоев их деталей;

замена произвольных потоков веществ и энергии внутри ПТ организованным автоколебательным режимом обмена между средой трения, включая ДТ, и железом деталей ПТ.

Экспериментально проверенными примерами реализации этих направлений являются:

регламентированное обязательное содержание зерн и фосфора во всем объеме деталей, изготавливаемых из сталей типа ШХ-15;

замена азотируемой стали 25Х5М, в случае сохранения использования этого класса сталей для изготовления прецизионных плунжерных ПТ, что рационально только при массовом производстве и обеспечении селективной сборки, на сталь 30Х3М2СА;

введение в ДТ и другие среды трения специально синтезированных металлодержащих соединений (0,5%); при этом рационально проведение всех обкаточных и регулировочных работ на ДТ с такими присадками, а также замена масла в картере насосов ТА на ДТ с этими присадками с одновременной доработкой конструкции насосов.

6. Согласно разработанной блок-схеме диагностирования и регулирования процесса трения и изнашивания ПТ ТА кардинальное повышение их долговечности должно быть обеспечено комплексом вычислительных и экспериментальных исследований, полнота которых может меняться в каждом конкретном случае.

7. Результатом исследований для кардинального повышения долговечности высокоточных стальных ПТ ТА в каждом конкретном случае должен стать свой комплекс конструктивных, технологических и эксплуатационных мероприятий. При этом целью конструктивных мероприятий должны быть обеспечение основных характеристик впрыскивания и распыливания топлива при ограничении максимальных значений нагрузок и относительных скоростей в ПТ; нейтрализация влияния динамических и статических деформаций и взаимного перекоса деталей; гарантированное обеспечение средой трения наиболее нагруженных участков поверхностей. Технологические мероприятия должны обеспечивать правильный выбор методов создания самих ПТ, что особенно важно для прецизионных пар (в зависимости от материала деталей и типа производства - парная шлифовка или селективная сборка), стабильность финишных механических (по шероховатости) и химико-термических (по микротвердости, химсоставу и фазам поверхностных слоев) операций обработки, введение операций, способствующих удерживать среду трения (например, замена оксидации на операцию создания развитого субмикрорельефа), использование при обкатках и регулировках ДТ с присадками, обеспечивающими автоколебательные обменные процессы в ПТ, еще в конце технологического цикла изготовления ТА. Эксплуатационные мероприятия должны способствовать продлению или возобновлению действия ряда конструктивных и технологических мероприятий.

8. Разработаны конкретные комплексы мероприятий для устранения схватывания и снижения износа стальных ПТ разновидностей ТА тракторного, автомобильного и тепловозного назначений. Часть из них внедрена на заводах-изготовителях, которыми оценен и экономический эффект устранения ряда дефектов.

Основное содержание работы отражено в 4 книгах, 36 статьях, 12 тезисах докладов на МНТК и ВНТК, в том числе в публикациях:

1. Горбаневский В.Е. Гидродинамический расчет привода быстроедействующих возвратно-поступательно движущихся масс // Вестник машиностроения. - 1978. - № 10. - С. 47-51.

2. Горбаневский В.Е., Мирошников В.В. Пушкарева К.А. Оптимизационные расчеты - основа системы САПР (на примере топливной аппаратуры) // Проблемы автоматизации разработки двигателей. Тезисы докладов ВНТК. - Коломна, 1978. - С. 88-92.

3. Крутов В.И., Горбаневский В.Е. Математическая модель впрыска и распыливания топлива дизельной топливной аппаратурой. // Изв. вузов. Машиностроение. - 1987. - № 5. - С. 38-44.

4. Крутов В.И., Горбаневский В.Е., Кислов В.Г. Топливная аппаратура с гидроприводом плунжера. - М.: Машиностроение, 1980. - 167 с.

5. Параметрическая оптимизация топливной аппаратуры дизеля / В.Е. Горбаневский, В.В. Мирошников, В.Г. Кислов и др. // Автомобильная промышленность. - 1984. - № 5. - С. 10-13.

6. Беспрецизионные клапанные форсунки быстроходных дизелей / В.Е. Горбаневский, Ю.П. Долгополов, В.Г. Кислов и др. - Киев: Вища школа, 1987. - 142 с.

7. Крутов В.И., Горбаневский В.Е., Кислов В.Г. Топливная аппаратура автотракторных двигателей. - М.: Машиностроение, 1985. - 207 с.

8. Противоизносные и противозадирные свойства дизельных топлив и бензинов / А.Ф. Шепель, В.Е. Горбаневский, В.М. Люлько и др. // Двигателестроение. - 1982. - № 2. - С. 45-47.

9. Повышение безотказности и сроков службы плунжерных пар топливных насосов / Б.И. Костецкий, А.К. Караулов, В.Е. Горбаневский и др. // Двигателестроение. - 1980. - 12. - С. 54-57.

10. Горбаневский В.Е., Кислов В.Г., Выхерт М.М. Трибологические проблемы прецизионных стальных пар трения, работающих в низкомолекулярных углеводородных топливах и системный подход к их решению // Трение, износ и смазочные материалы. Труды МНТК. - Ташкент. - 1985. - Т. II. - С. 100-105.

11. Исследование закономерностей поверхностного разрушения методом контактного электросопротивления / Б.И. Костецкий, Б.В. Гушка, В.Е. Горбаневский и др. // Вестник машиностроения. - 1988. - № 1. - С. 14-17.

12. Горбаневский В.Е., Ващенко А.Н. Изнашивание стальных прецизионных пар трения, работающих в низкомолекулярных жидкостях // Проблемы трения и изнашивания. Республиканский научно-технический сб. (Киев). - 1987. - Вып. 32. - С. 38-43.

13. Горбаневский В.Е., Тильченко А.М. Влияние вибрационных нагрузок на износ стальных прецизионных пар трения // Энергетика ДВС. Сб. научных трудов. - М., 1985. - С. 24-31.

14. Горбаневский В.Е., Корнилов Г.С., Решиков В.Ф. Процес-

он, ответственные за охватывание и повышенный износ прецизионных и точных стальных пар трения топливных насосов // Проблемы совершенствования рабочих процессов в ДВС. Сб. тезисов докладов ВНТК. - М., 1986. - С. 166-167.

15. Механизм противоизносного действия некоторых структур соединений в дизельном топливе / В.Г.Кислов, В.Е.Горбаневский, Т.В.Терновая и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 1988. - № 5. - С. 31-32.

16. Обеспечение долговечности стальных пар трения, работающих в топливах / В.Г.Кислов, В.Е.Горбаневский, Т.В.Терновая и др. // Ремдеталь-88. Сб. тезисов докладов МНТК стран СЭВ. - Пятигорск, 1988. - Ч. I. - С. 79.

17. Горбаневский В.Е., Терновая Т.В., Маслов В.Т. Противоизносное действие некоторых веществ в дизельном топливе при длительной эксплуатации стальных пар трения // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - № 3. - С. 44-47.

18. Горбаневский В.Е., Корнилов Г.С., Вихерт М.М. Повышение ресурса ТНВД форсированных дизелей КамАЗ // Автомобильная промышленность. - 1987. - № 8. - С. 5-7.

19. Лаптева В.Г., Горбаневский В.Е. Выбор методов повышения износостойкости пар трения, изготавливаемых из сталей типа ШХ-15 // Трение и износ. - 1988. - Т. 9, № 1. - С. 43-51.

20. Горбаневский В.Е. ЭВМ в исследованиях топливоподающей аппаратуры транспортных дизелей // ЭВМ в исследованиях работы автотракторных средств. Межвузовский сб. научных трудов. - М., 1988. - С. 16-19.

21. Горбаневский В.Е., Федоров Л.Е. К вопросу определения контактных давлений между клапаном и седлом форсунки // Тракторы и сельхозмашины. - 1979. - № 5. - С. 8-9.

22. Горбаневский В.Е., Горбач Р.Н., Котин Е.М. Повышение работоспособности кулачка топливного насоса быстроходного дизеля // Сб. НИИинформтязмаш. - 1972. - № 4-72-4. - С. 33-40.

23. Вероятностный расчет долговечности кулачков топливных насосов / В.Е.Горбаневский, В.П.Кагаев, Б.Ф.Кригер и др. // Вестник машиностроения. - 1981. - № 11. - С. 16-19.

Материалы работы защищены авторскими свидетельствами: № 202651, 399615, 421789, 663873, 717388, 742618, 879386,

1177528, 1307075, 1343082, 1439469, опубликованными в бюл. № 32 19, 1967 г.; 39, 1973 г.; 12, 1974 г.; 19, 1979 г.; 7 и 23, 1980 г.; 41, 1981 г.; 33, 1985 г.; 16 и 37, 1987 г.