

Степанов Виктор Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И  
СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
СМАЗЫВАЕМЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ  
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО  
ПАРАМЕТРАМ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА В МАСЛЕ**

Специальности 05.04.12 - Турбوماшины и комбинированные  
турбоустановки, 05.02.04 - Трение и износ в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва - 2000

Работа выполнена в ГНЦ «Центральный институт авиационного  
моторостроения им. П.И.Баранова»

Официальные оппоненты: - доктор технических наук

Иноземцев А.А.

- доктор технических наук, профессор

Бобров С.Н.

- доктор технических наук

Куфтов А.Ф.

Ведущее предприятие: ГОСНИИГА



Защита состоится «28» апреля 2000 г. в 14<sup>30</sup> часов на  
заседании диссертационного совета Д053.15.10 в Московском  
государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу  
107005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1, корпус факультета

34Э

г.

хся в библиотеке МГТУ им.

эмплярах, заверенные печатью

07005, г. Москва, 2-я Бауманская

етарю диссертационного совета

1566 776

2000 г.

ета

*И*

Н.А.Ивашенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Безопасность полетов авиационной техники определяется уровнем надежности, заложенной при ее проектировании и производстве, а также эффективностью средств и методов диагностики ее технического состояния, обеспечивающих раннее обнаружение дефектов, возникающих в процессе эксплуатации.

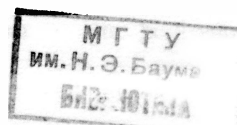
Опыт эксплуатации газотурбинных двигателей в России показывает, что до 35%, а по данным фирмы Ролс-Ройс до 55%, от общего числа отказов двигателей связано с выходом из строя смазываемых узлов трения. Это обстоятельство обуславливает ту важную роль, которую должна играть диагностика по параметрам продуктов износа в масле\* в общей системе диагностики ГТД.

Трибодиагностику условно можно разделить на две составные части - бортовую и лабораторную. Бортовая трибодиагностика необходима для предупреждения о дефекте узлов трения во время работы двигателя за небольшой период времени до возникновения опасности их разрушения.

В качестве бортовых средств трибодиагностики в основном используются сигнализаторы стружки в масле, фильтры сигнализаторы и магнитные пробки, которые не обеспечивают достаточной достоверности информации о состоянии смазываемых узлов трения. В последнее время в качестве бортовых средств трибодиагностики находят все большее распространение автоматизированные системы предупреждения аварийного износа, основанные на различных физических принципах. Наибольший интерес представляют исследования и разработка фирм Vickers (Tedeco), GasTOPS, АО «Люлька-Сатурн», ГАНГ им И.М.Губкина.

---

\*Далее трибодиагностика



Лабораторная трибодиагностика предназначена для долгосрочного прогнозирования дефекта и определения его местонахождения в системе смазки. До недавнего времени для лабораторной трибодиагностики в эксплуатации авиационной техники в России применялся только спектральный анализ масла. При этом в качестве критерия оценки технического состояния смазываемых узлов трения используется концентрация металлов в масле, для которой устанавливаются значения повышенной концентрации (ПК), при достижении которой двигатель ставится на особый контроль, и предельно-допустимой концентрации (ПДК), при которой двигатель снимается с эксплуатации. Большой вклад в развитие спектрального анализа для трибодиагностики смазываемых узлов трения в России внесли работы, проведенные в ВНИИЖТ, 13-м институте ВВС, ЦИАМ им. П.И.Баранова, ГАНГ им. И.М.Губкина, ГОСНИИГА, НИИ ВВС, НПО «Сатурн», ОАО «Аэрофлот», ОАО «Авиадвигатель», а/к «Внуковские авиалинии».

Однако частицы износа, находящиеся в смазочном масле, несут гораздо больше информации о процессах износа в узлах трения, чем ее используется в указанном методе. К параметрам, несущим эту информацию, относятся распределение размеров частиц износа, форма, соотношение размеров и состав отдельных частиц, состояние их поверхностей, наличие в масле различных механических примесей неметаллического происхождения, образующихся в процессе работы узла трения или попадающих в маслосистему из вне.

Решение проблемы повышения надежности двигателей и агрегатов путем наиболее полной регистрации и анализа всех параметров, заложенное в комплексном подходе к трибодиагностике, т.е. одновременном использовании спектрального и феррографического анализов масла и других методов, позволит значительно повысить достоверность результатов оценки технического состояния смазываемых узлов трения ГТД и приобретает

актуальность при переходе на эксплуатацию авиационной техники по техническому состоянию.

Актуальность темы диссертации, направленной на разработку методов и средств комплексной трибодиагностики технического состояния смазываемых узлов трения подтверждается тем, что она связана с выполнением работ по:

1. Программе развития ГА до 2000 г., утвержденной Правительством РФ 11.06.92 г. № Г4-П10-4-756.

2. Целевой комплексной программе по разработке и внедрению отраслевой системы диагностического обслуживания газотранспортного оборудования компрессорных станций РАО "ГАЗПРОМ" до 2000 г.

**Цель работы.** Разработка и исследование методов и средств, составляющих комплексную систему трибодиагностики, обеспечивающих получение наиболее полной информации о техническом состоянии смазываемых узлов трения ГТД, что особенно важно при переходе на эксплуатацию авиационной и наземной техники по состоянию. Разработка методов и средств исследования смазывающей способности масел на основе использования принципов трибодиагностики.

**Основными задачами, решаемыми в работе, являются:**

- разработка математической модели, устанавливающей соотношение между интенсивностью изнашивания смазываемых узлов трения двигателя и концентрацией частиц износа в масле, учитывающей эффективность фильтрации, расход масла в маслосистеме, влияние доливок масла и тип маслосистемы;
- проведение исследований рентгено-флуоресцентных анализаторов с целью определения их аналитических характеристик, разработка методики приготовления градуировочных образцов для рентгено-

флуоресцентного анализа, исключающей недостатки применяемой в настоящее время методики;

- разработка аналитического феррографа, схема подачи масла в котором исключает искажение информации, связанное с потерей и разрушением частиц износа;
- разработка метода и прибора для оценки интенсивности изнашивания для феррографического анализа масла;
- разработка бортовой системы предупреждения аварийного износа смазываемых узлов трения ГТД с самосбрасывающим контактным датчиком, дающей более достоверную информацию о состоянии узлов по сравнению с существующими системами;
- разработка модели процесса образования сферических частиц износа в усталостных микротрещинах при качении в условиях гидродинамической смазки трущихся поверхностей;
- разработка модели, объясняющей влияние кавитационных явлений в микротрещинах и на поверхностях трения на процессы усталостного выкрашивания;
- разработка методов и средств для исследования противоизносных, противозадирных и противопиттинговых свойств масел с использованием принципов трибодиагностики;

Разработанные автором теоретические основы, методы и новое оборудование для трибодиагностики технического состояния смазываемых узлов трения ГТД различного назначения имеют важное народнохозяйственное значение, способствуют повышению безопасности эксплуатации ГТД и экономической эффективности использования техники.

**Методы исследования.** Достижение поставленной цели осуществлялось путем теоретических и экспериментальных исследований, а также конструкторских разработок.

Экспериментальные исследования при разработке лабораторных средств и методов трибодиагностики проводились при эксплуатации авиадвигателей, авиационных турбохолодильников, механизма перестановки стабилизатора самолета ЯК-42, стенда для испытания авиационных масел Ш-3, прибора трения валик-ролик ПТВР и установки, разработанной для исследования кавитационной эрозии в тонкой пленке смазочного материала.

Испытания бортовой системы трибодиагностики проводились в ОАО "Авиадвигатель" на установке, моделирующей работу маслосистемы ГТД.

При анализе продуктов износа в масле и исследовании поверхностей деталей узлов трения использовалась следующая аппаратура:

- электронный сканирующий микроскоп DSM-960 фирмы «Оптон» (Германия) с анализатором состава материала фирмы ЛИНК (Англия);
- атомно-флуоресцентный спектрометр AFS-2000 фирмы БЭРД (США);
- атомно-эмиссионный спектрометр МОА фирмы БЭРД (США);
- феррографическая система фирмы «Фоксборо» (США);
- феррографическая система фирмы «ПРЕДИКТ» (США);
- рентгено-флуоресцентные анализаторы БАРС-3 и «Спектроскан»;
- атомно-эмиссионный спектрометр МФС-7.

Экспериментальные данные подвергались соответствующей статистической обработке с использованием ПЭВМ.

**Научной новизной** обладают следующие результаты, полученные в диссертации:

1. Математическая модель, устанавливающая соотношение между интенсивностью изнашивания смазываемых узлов трения двигателя и концентрацией частиц износа в масле, учитывающая эффективность фильтрации, параметры маслосистемы и ее тип, являющаяся основополагающей при разработке методов трибодиагностики для различных систем смазки.

2. Модель процесса образования сферических частиц износа в усталостных микротрещинах. Появление сферических частиц размером 2-10 мкм в масле - первый признак образования усталостных микротрещин на поверхностях трения при качении.

3. Модель, объясняющая влияние кавитации в зоне контакта трущихся пар на усталостное выкрашивание поверхностей, а также влияние кавитационных явлений в усталостных микротрещинах на расклинивающее действие смазочных масел.

4. Принцип действия системы предупреждения аварийного износа смазываемых узлов трения ГТД с самосбрасывающим датчиком, исключающая «ложные срабатывания», на котором была разработана система СПАИ-2 (Патент № 2131552 от 10.06.99).

5. Способ подачи масла на предметное стекло в аналитической феррографии (А.С. № 1691714 от 15.07.91), исключающий потерю информации из-за неполного поступления частиц износа на феррограмму или их разрушения в процессе подачи масла, позволивший разработать аналитические феррографы ОМ-1 и ФАН-1.

6. Метод сканирования феррограмм, позволяющий оценивать изменение интенсивности изнашивания узлов трения, на базе которого разработано устройство анализа феррограмм ДКС-1.

7. Методы оценки противоизносных, противозадирных и противопиттинговых свойств масел с применением принципов трибодиагностики, позволяющих проводить инструментальную, количественную оценку смазывающей способности масел (А.С. № 422112 от 08.05.88, А.С. № 635068 от 15.11.90), и оборудование, разработанное для реализации этих методов.

**Достоверность результатов работы подтверждена:**

- статистической обработкой экспериментальных данных;
- систематическим метрологическим контролем точности измерительных приборов;
- применением нескольких независимых методов оценки исследуемого параметра.
- успешным опытом применения разработанных методов и оборудования.

**Практическая ценность** результатов работы заключается в том, что на базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований созданы методы и средства трибодиагностики и оценки смазывающей способности масел.

По результатам исследований реализованы:

- бортовая система предупреждения аварийного износа узлов трения ГТД (прошла испытания в АО «Авиадвигатель» и ЛИИ им. М.М. Громова);
- аналитический феррограф ОМ-1 (внедрен в ОАО «Аэрофлот», ОАО «Авиадвигатель», НИИ ВВС, НПО им. В.Я. Климова, МВЗ им. М.Л. Миля, ИТЦ «Оргтехдиагностика» РАО «ГАЗПРОМ», ЛИИ им. М.М. Громова);
- аналитический феррограф ФАН-1 (внедрен в а/к «Внуковские авиалинии»);
- автоматическое устройство считывания феррограмм ДКС-1 (внедрено в АО «Авиадвигатель», АО «Аэрофлот», а/к «Внуковские авиалинии», ИТЦ «Оргтехдиагностика» РАО ГАЗПРОМ);
- атласы частиц износа для двигателей АЛ-31, ПС-90А, Д-30-КУ, КП;
- методика расфировки феррограмм с помощью автоматического считывающего устройства;
- методика МЦ-22-87 сравнительной оценки способности авиационных масел противостоять кавитационной эрозии поверхностей трения в тонкой смазочной пленке;

- методика оценки противоизносных и противозадирных свойств масел на установке III-3 с применением принципов трибодиагностики;
- методика оценки противоизносных и противозадирных свойств авиационных масел на приборе трения валик-ролик (ПТВР).

**Апробация работы.** Результаты работы были доложены и обсуждены на:

V Всесоюзной научно-технической конференции «Эксплуатационные свойства авиационных топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей», (Киев, КИИГА, 1981 г.); Межотраслевой научно-технической конференции «Опыт применения и перспективы развития диагностики состояния авиадвигателей в эксплуатации», (Москва, ЦИАМ, 1984 г.); Всесоюзной научно-технической конференции «Несущая способность и качество зубчатых передач и редукторов машин», (Алма-Ата, 1985г.); Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы повышения надежности эксплуатации смазываемых узлов авиационной техники», (Москва, ГОСНИИГА, 1987 г.); 12-м конгрессе по нелинейной акустике, (Остин, США, 1990 г.); Международной конференции «Condition Monitoring 91», (Эрдинг, Германия, 1991 г.); Научно-технической конференции «Высокое качество и надежность машиностроительной продукции - через исследования, контроль и диагностику», (Москва, 1991 г.); Международной конференции «Condition Monitoring 94», (Сванси, Англия, 1994 г.); Международной конференции «Tribos 94», (Буэнос-Айрес, Аргентина, 1994 г.); 1-й Международной конференции «Энергодиагностика 95», (Москва, 1995 г.); Международной конференции «Integrated Monitoring & Failure Prevention», (Мобил, США, 1996 г.); Международной конференции «Condition Monitoring' 97» (Сиань, Китай, 1997 г.); 2-й Международной конференции "Энергодиагностика 98", (Москва, 1998 г.).

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 24 печатных работы, получено 3 авторских свидетельства, один патент. Автор награжден серебряной медалью ВДНХ СССР (1990 г.).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и основных выводов, изложена на 357 страницах машинописного текста, содержит 130 рисунков, 36 таблиц, библиографию из 216 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель исследований, актуальность рассматриваемых вопросов, дана краткая характеристика работы, ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ литературы и современного состояния трибодиагностики.

Одним из критериев оценки технического состояния смазываемых узлов трения является концентрация частиц износа или металлов в масле и динамика ее изменения с увеличением наработки узла. Но концентрация продуктов износа является не только функцией наработки, но и параметров маслосистемы: расхода и утечек масла, объема масла в маслосистеме, эффективности фильтрации, доливок масла и т.д.

Д.Лотаном была предложена математическая модель, определяющая взаимосвязь интенсивности изнашивания деталей и концентрации продуктов износа в масле в зависимости от параметров маслосистемы без учета эффективности фильтрации. Эффективность фильтрации была учтена Д.Джексоном. Им также было установлено существование равновесной концентрации и найдено выражение для нее для дизельных двигателей. Но

концентрация продуктов износа в масле не является единственным критерием оценки технического состояния смазываемых узлов трения.

В качестве критериев оценки технического состояния смазываемых узлов трения двигателя могут быть приняты и другие характеристики частиц износа.

В дополнение к концентрации частиц износа в масле критериями оценки технического состояния смазываемых узлов трения двигателя могут служить следующие параметры частиц износа:

- - форма, соотношение размеров, состояние поверхностей отдельных частиц износа, определяющие вид износа, реализуемый в зоне трения - определяется с помощью аналитической феррографии;
- - распределение размеров частиц износа, с помощью которого можно оценить интенсивность изнашивания - определяется с помощью счетчиков частиц, автоматическим устройством считывания феррограмм в аналитической феррографии;
- состав материала отдельных частиц износа, с помощью которого можно локализовать дефект - определяется электронной микроскопией с микроанализом состава частиц или методом нагревания феррограмм, при котором частицы износа меняют цвет.

Эти параметры контролируются феррографическим анализом масла. Аналитическая феррография - метод магнитного осаждения частиц износа из проб смазочного масла, взятого из маслосистемы двигателя, на поверхности специальной стеклянной пластины для последующего анализа с помощью оптического или электронного сканирующего микроскопа. Целью анализа является определение интенсивности и видов износа (нормальное изнашивание, микрорезание, задиры, усталостное выкрашивание и т.д.), а также оценка режимов трения и смазки. Первые феррографические системы появились в начале 70-х годов. Идея феррографии принадлежит фирме ПРЕДИКТ, которая и сейчас является ведущей в области промышленного выпуска феррографических систем. Но феррографы фирмы ПРЕДИКТ имеют ряд существенных

недостатков, приводящих к потере или разрушению отдельных частиц в процессе приготовления феррограмм - совокупности частиц износа, осажденных на специальной стеклянной пластине.

Очевидно, что для получения достоверной информации о техническом состоянии смазываемых узлов трения необходим комплекс методов лабораторной трибодиагностики, позволяющий наиболее полно исследовать характеристики продуктов износа, содержащихся в смазочном масле. Комплексная лабораторная система трибодиагностики позволяет осуществлять диагностирование технического состояния узлов на ранней стадии развития дефекта за десятки часов до наступления разрушения деталей и узлов и выхода двигателя из строя.

Комплексная лабораторная система трибодиагностики включает в себя:

- аналитическую феррографию;
- спектральный анализ.

Как указывалось выше, в качестве спектральной части комплексной лабораторной системы трибодиагностики может быть использовано любое спектральное оборудование. В России в качестве прибора для спектрального анализа масла используются фотоэлектрические спектральные установки МФС, которые до конца 80-х годов являлись основным средством, применяемым для трибодиагностики смазываемых узлов трения ГТД. Этим установкам присущи недостатки, характерные для всех атомно-эмиссионных спектрометров. Основной из них - это невозможность достоверного определения элементного состава частиц износа размером более 5 мкм. Также существенным недостатком является то, что в результатах определения концентрации элементов большую долю составляет концентрация растворенного металла, который не представляет интереса для трибодиагностики.

В 80-х годах 13 институтом МО для трибодиагностики отечественных ГТД было предложено в качестве спектрального прибора использовать портативный безкристальный рентгено-флуоресцентный анализатор БАРС-3. При этом

анализатор требовалось доработать с целью повышения его чувствительности и разработать методы концентрирования пробы и приготовления градуировочных образцов для калибровки прибора. Доработки анализатора, суть которых изложена в диссертации, были выполнены 13-м институтом МО и НПО «Буревестнику».

До недавнего времени в качестве бортовой системы трибодиагностики использовались простейшие устройства, такие как магнитные пробки, фильтры-стружкосигнализаторы, сигнализаторы стружки в масле. Основным недостатком этих систем является невозможность оценки динамики изменения концентрации частиц износа с увеличением наработки двигателя.

Практический опыт ведущих фирм-изготовителей газотурбинных двигателей показывает, что из существующих современных методов диагностики технического состояния узлов трения ГТД наиболее многообещающим и перспективным является непрерывный автоматизированный бортовой контроль концентрации частиц износа в масле. Начало разработки методов и средств бортовой автоматизированной трибодиагностики относится к концу 70-х годов. В середине 80-х годов в разработке находилось уже более десяти видов устройств, использующих различные физические принципы для обнаружения частиц износа в масле ГТД, определения интенсивности их образования, размеров и массы, а также классификации частиц на ферромагнитные и неферромагнитные.

Среди удачных разработок, нашедших практическое применение, особое место занимает система с магнитоиндукционным датчиком, выпускаемая фирмой Tedeco (Vickers) (США) марки «QDM», которая была запатентована еще в 1980 г., но до сих пор сохраняет лидирующее положение на рынке.

Большое влияние на долговечность смазываемых узлов трения оказывают свойства применяемого смазочного материала и, в особенности, смазывающая способность. Смазывающая способность масел для авиационных ГТД является

одной из основных эксплуатационных характеристик и является совокупностью противоизносных, противозадирных и противопиттинговых свойств.

Индивидуальное влияние каждого из этих свойств на долговечность узлов трения зависит от условий их работы: температуры, контактных напряжений, скоростей скольжения и качения в зоне контакта, состояния рабочих поверхностей и т.д.

Например, при умеренных нагрузках, скоростях и температурах основное влияние на долговечность узлов трения будут оказывать противоизносные свойства масел, при качении с проскальзыванием в условиях больших скоростей качения и нагрузок основную роль играют противопиттинговые свойства, а при высоких нагрузках и скоростях скольжения определяющим являются противозадирные свойства.

В лабораторных условиях смазывающие свойства оцениваются при помощи различных методов с использованием разнообразных машин трения, на которых оценка смазывающей способности ведется в большинстве случаев по совокупности ее свойств без количественной оценки каждого из составляющих в отдельности, хотя это бывает необходимо при выборе масел для конкретных узлов трения.

На основании анализа литературы и современного состояния трибодиагностики сформулированы цель и задачи исследования.

В своих исследованиях автор опирался на работы: Д.Андерсена, К.В.Анисовича, Д.Бетчелора, И.А.Биргера, С.Н.Боброва, Н.А.Буше, И.А.Буяновского, Э.Д.Брауна, В.Весткотта, Р.Воуена, Г.В.Виноградова, Ю.А.Дроздова, М.Джонса, Ю.С.Заславского, И.В.Крагельского, Б.И.Костецкого, С.И.Калашникова, Д.С.Коднира, Р.Кнэппа, Д.Лотана, Р.М.Матвеевского, А.И.Петрусевича, П.А.Ребиндера, Д.Н.Решетова, Д.Скотта, Д.Хэмита, М.М.Хрушева, А.В.Чичинадзе и других авторов, в которых рассмотрены общетеоретические и различные аспекты прикладных вопросов процессов изнашивания и трибодиагностики.

Во второй главе представлена разработанная автором математическая модель, описывающая связь между интенсивностью изнашивания поверхностей трения и концентрацией частиц износа в масле.

Критерием оценки технического состояния смазываемых узлов трения может служить сумма скоростей изнашивания поверхностей трения отдельных деталей узла. Но скорость изнашивания трудно, а порой и невозможно, контролировать в процессе эксплуатации реального двигателя.

Однако, при работе двигателя, можно производить отбор проб масла и исследовать состояние поверхностей трения по параметрам частиц износа, содержащихся в пробе масла, которые несут важную и подробную информацию о процессах износа в маслосистеме двигателя. Одним из таких параметров является концентрация частиц износа в масле.

Для правильного понимания сущности трибодиагностики необходимо установить связь между скоростью изнашивания узлов маслосистемы и величиной концентрации частиц износа в масле, которая очевидно зависит и от других характеристик маслосистемы.

При этом приняты следующие обозначения:

$m$  - массовая скорость образования частиц износа, мг/с;

$V_0$  - начальный объем масла в маслосистеме двигателя, мл;

$V$  - объем масла в маслосистеме в момент времени  $t$ , мл;

$q$  - величина утечек масла из маслосистемы, мл/с;

$q=V/V_0$  - относительная утечка масла, 1/с;

$v$  - расход масла через маслосистему, мл/с;

$v=v/V_0$  - относительный расход масла, 1/с;

$C$  - концентрация частиц износа в масле, мг/мл;

$C_0$  - начальная концентрация частиц износа, мг/мл;

$\gamma$  - эффективность фильтрации;

$t$  - время, с.

Источниками попадания и потери частиц при работе двигателя за период времени  $t, t+\Delta t$  являются:

1. Частицы износа, присутствующие в маслосистеме двигателя в момент времени  $t$ :

$$M_1 = VC = (V_0 - qt)C.$$

Частицы износа, поступающие в маслосистему при износе поверхностей трения:

$$M_2 = m\Delta t.$$

2. Частицы износа, теряемые с утечкой масла в элементах маслосистемы:

$$M_3 = Cq\Delta t.$$

4. Частицы износа, оседающие в фильтрах:

$$M_4 = \gamma C v \Delta t.$$

Уравнение материального баланса частиц износа в маслосистеме двигателя после соответствующих преобразований будет иметь вид:

$$dC/dt + v\gamma(C, t)C/(V_0 - qt) = m(t)/(V_0 - qt). \quad (1)$$

Это дифференциальное уравнение динамики загрязнения маслосистемы продуктами износа, решение которого представляет значительные трудности, т.к. неизвестны выражения для зависимостей  $\gamma = \gamma(C, t)$  и  $m = m(t)$ .

По окончании процесса приработки скорость изнашивания поверхностей узлов трения становится постоянной, т.е.  $m = \text{const}$ . Можно также предположить, что  $\gamma = \text{const}$ . После интегрирования и соответствующих преобразований получаем выражение:

$$C = C_0(1 - qt)^{\gamma v/q} + m[1 - (1 - qt)^{\gamma v/q}] / \gamma V_0 v. \quad (2)$$

Предел значения концентрации  $C$  из выражения (2) при  $t \rightarrow \infty$ :

$$C_p = m/\gamma v. \quad (3)$$

- является значением равновесной концентрации частиц износа при постоянной интенсивности изнашивания поверхностей трения.

Из выражения (3) видно, что равновесная концентрация частиц износа в масле определяется скоростью износа и интенсивностью фильтрации, и, если после окончания процесса приработки концентрация частиц износа с ростом времени работы двигателя не изменится, то можно считать, что ее значение близко к значению равновесной концентрации. Важным обстоятельством является то, что равновесная концентрация не зависит от начальной концентрации  $C_0$ .

По известному значению равновесной концентрации суммарная скорость изнашивания смазываемых узлов трения двигателя может быть найдена из выражения:

$$m = C_p \gamma v.$$

На рис. 1 представлен график зависимости концентрации частиц износа в масле двигателя от наработки за весь срок его эксплуатации.

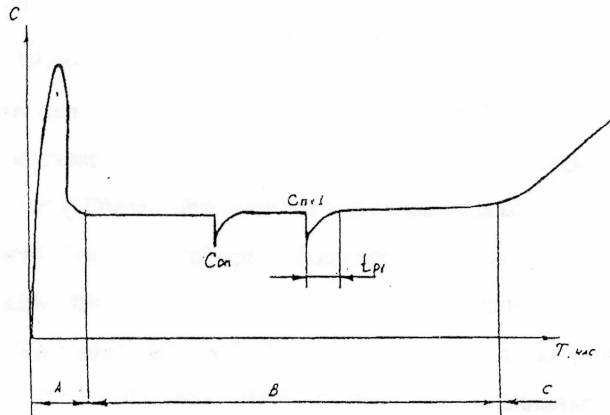


Рис. 1 Зависимость концентрации частиц износа в масле от наработки за весь период эксплуатации двигателя

На графике: А - период приработки; В - период нормального износа, когда средняя скорость изнашивания постоянна; С - период повышения интенсивности износа. Повышение интенсивности износа указывает на возникновение дефектов в узлах трения двигателя.

Следует отметить, что уравнение (1) устанавливает зависимость скорости образования частиц износа и концентрации их в масле за весь период эксплуатации двигателя, а уравнение (2) справедливо только в период В.

На рисунке также показано влияние регламентных доливок масла на изменение концентрации частиц износа. Из рисунка видно, что в момент доливки масла происходит падение концентрации, но, с увеличением наработки, концентрация возрастает и достигает равновесного значения.

Время достижения равновесной концентрации определяется скоростью образования частиц износа, эффективностью фильтрации, объемом маслосистемы, количеством доливаемого масла и расходом масла через маслосистему двигателя.

Из сказанного следует, что концентрация частиц износа может служить критерием оценки технического состояния смазываемых узлов трения двигателя, при этом отбор проб масла должен производиться до регламентных доливок.

Время достижения равновесной концентрации при полной смене и доливке масла может быть определено экспериментально для каждого типа двигателя.

Одним из самых распространенных и опасных видов дефектов узлов трения при качении является питтинг (усталостное выкрашивание) контактных поверхностей. Началом процесса питтинга является образование на поверхностях трения усталостных микротрещин. При этом вплоть до появления первой каверны усталостного выкрашивания преобладающим видом образующихся частиц износа, попадающим в масло, являются сферические частицы размером 2-5 мкм, весовой вклад которых в общую массу образующихся при нормальном износе частиц составляет несколько процентов, что соизмеримо с точностью.

используемого при диагностике спектрального оборудования, поэтому процесс образования на поверхностях трения усталостных микротрещин не может контролироваться спектральным анализом. Однако этот процесс очень хорошо контролируется с помощью феррографического анализа. В диссертации более подробно излагаются те дефекты, которые могут быть определены только с помощью феррографии.

Автором предложена следующая гипотеза механизма образования сферических частиц износа в усталостных микротрещинах.

При работе узла трения шероховатые стенки образовавшихся микротрещин совершают сложные движения относительно друг друга, с большой частотой, пропорциональной скоростным режимам работы узла.

При смыкании микротрещин микронеровности на их противоположных поверхностях сталкиваются друг с другом. При больших скоростях соударения и высоких контактных давлениях температуры в зоне контакта могут достигать значений, достаточных для плавления металла, поэтому происходит оплавление поверхностей. Если же в зону контакта попадает частица износа, образовавшаяся в микротрещине или попавшая в нее из слоя смазки, происходит ее мгновенное плавление при высоком давлении окружающей среды. При этом образуются сферические частицы оплавленного металла, которые могут привариваться к одной из поверхностей микротрещины. Такие частицы были обнаружены на поверхности микротрещины при долоте зуба шестерни по микротрещине.

В дальнейшем эти перемычки от вибрации или силового воздействия разрываются, образуя свободные сферические частицы, которые со смазочным маслом, выдавливаемым из микротрещины, попадают в пленку смазки между трущимися деталями и циркулируют в маслосистеме.

Таким образом, при образовании на поверхностях трения при качении усталостных микротрещин в масле появляются сферические частицы и их присутствие может служить диагностическим признаком начала процесса усталостного выкрашивания.

В условиях гидродинамической смазки в узлах трения ГТД в зонах контакта неминуемо возникают кавитационные явления и механизм развития усталостного выкрашивания на поверхностях трения необходимо рассматривать с учетом этих явлений. Может оказаться, что кавитационная эрозия вносит решающий вклад в развитие усталостного изнашивания. Это подтверждается наблюдениями автора при исследовании поверхностей частиц износа, характерных для усталостного выкрашивания, на которых обычно присутствует большое число язвин кавитационной эрозии.

Относительно влияния смазки на усталостное разрушение поверхностей трения в литературе принято представление о расклинивающем действии смазки, проникающей в краевые трещины на поверхностях трения. Наряду с расклинивающим действием смазки возможен и кавитационный механизм развития усталостных микротрещин, описание которого мы приводим ниже.

Действительно, в первичных микротрещинах на поверхностях трения при заполнении их маслом всегда остаются микроскопические газовые включения, которые могут служить ядрами кавитации.

Рассмотрим процессы, протекающие в усталостной микротрещине на поверхности трения, смазываемой маслом, при переменных давлениях в слое смазки.

Допустим, в какой-то момент трения вся полость микротрещины заполнена маслом, в котором присутствует какое-то количество свободного воздуха. При падении давления в слое смазки происходит сближение стенок микротрещины, но при этом, в результате падения давления, происходит выделение растворенного в масле газа с образованием парогазовой каверны. При следующем за этим повышении давления в слое смазки последняя нагнетается в микротрещину, а повышение давления приводит к схлопыванию парогазовой каверны. При схлопывании каверны происходит резкое повышение давления в окрестности точки схлопывания, подобное гидравлическому удару. Мгновенное повышение давления оказывает расклинивающее действие и приводит к

развитию микротрещины. Дальнейшее же повышение давления в слое оказывает дополнительное расклинивающее действие, но в значительно меньшей степени, чем при схлопывании каверны. Далее весь процесс повторяется с частотой, равной частоте пульсации давления.

Таким образом, при возникновении в микротрещинах кавитационных явлений, воздействие их на развитие усталостного выкрашивания поверхностей трения может превалировать над обычным расклинивающим действием смазки.

Оценка давлений, возникающих в слое смазки в условиях кавитации представлена в работе.

В третьей главе представлены результаты исследований аналитических характеристик рентгено-флуоресцентных анализаторов БАРС-3 и «Спектроскан», в результате которых установлено, что аналитические характеристики рентгено-флуоресцентного анализа, такие как предел обнаружения, погрешность и т.д. в большей степени определяются методом приготовления градуировочных образцов.

Автором разработан метод приготовления градуировочных образцов, в котором для уменьшения эффекта матрицы многокомпонентные образцы не содержат более 4-х элементов, причем эти элементы подобраны так, чтобы длина волны возбуждения одного элемента лежала как можно дальше от края поглощения другого элемента.

В области феррографии автором предложена схема подачи масла на феррограмму с помощью поршневого насоса, который обеспечивает полное попадание неповрежденных частиц износа на феррограмму, а также метод и прибор ДКС-1 для оценки распределения размеров частиц износа.

С учетом указанных предложений под руководством автора разработаны и изготовлены промышленные образцы отечественных феррографов ОМ-1 и ФАН-1, которые эксплуатируются в АО «Аэрофлот», АО «Авиадвигатель», ЛИИ, НИИ ВВС, МВЗ им. М.Л. Миля, НПО им. В.Я. Климова, а/к «Внуковские авиалинии».

Феррографическая система состоит из аналитического феррографа ОМ-1 (ФАН-1), бихроматического микроскопа "БИОЛАМ-И" и оптического прибора ДКС-1.

Разработанные автором прибор ДКС-1 и методика позволяют определять соотношение между концентрациями больших частиц износа  $D_L$  размером более 5 мкм и малых частиц  $D_S$  размером менее 2 мкм. Интенсивность износа оценивается с помощью выражения:

$$I_S = D_L^2 - D_S^2$$

или величинами  $D_L$ ,  $D_L + D_S$ ,  $D_L / (D_L + D_S)$ .

Прибор ДКС-1 смонтировано на микроскопе «БИОЛАМ-И» и позволяет также определять распределение частиц по размерам на всей длине феррограммы.

С целью автоматизации процесса анализа феррограмм под руководством автора спроектирован и изготовлен опытный образец анализатора изображения для феррограмм, который находится на подконтрольной эксплуатации в АО «Аэрофлот».

Анализатор изображения смонтирован на микроскопе «БИОЛАМ-И», на котором установлены видеокамера, сканирующий предметный столик, устройство фокусировки. Все механизмы управляются ПЭВМ.

Четвертая глава посвящена вопросам разработки бортовых систем предупреждения аварийного износа.

Автором предложен новый принцип действия бортовой системы трибодиагностики названной системой предупреждения аварийного износа СПАИ.

За время разработки СПАИ было предложено и опробовано четыре варианта систем, пока не был получен окончательный вариант СПАИ-2, который

состоит из датчика и электронного блока регистрации значений измеряемого параметра и управления работой датчика.

Датчик СПАИ-2 содержит магнитный управляемый чувствительный элемент контактного типа и действует по принципу реле с нормально разомкнутыми контактами. Контакты одновременно являются разноименными полюсами магнитной системы с постоянным магнитом. Магнитное поле, взаимодействуя с находящимися вблизи чувствительного элемента частицами износа, увлекает их в зазор между полюсами, в результате чего через некоторое время контакты оказываются замкнутыми либо отдельной крупной частицей, либо цепочкой накопившихся мелких частиц. Факт замыкания контактов регистрируется соединенным с датчиком электронным устройством (блоком управления), которое одновременно вырабатывает импульс тока, размагничивающего постоянный магнит с помощью имеющегося в датчике соленоида. После этого частицы свободно вымываются из зазора потоком масла и контакты размыкаются. Затем, через определенное время, необходимое для полного удаления всех осевших частиц из зазора и сброса их в линию откачки, электронное устройство вырабатывает второй импульс тока, который намагничивает магнит и возвращает систему в исходное состояние. Далее процесс повторяется.

Критерием оценки интенсивности износа трущихся деталей двигателя является число срабатываний датчика  $f$  за определенный, экспериментально устанавливаемый для каждого двигателя, период времени. Общий вид окончательного варианта датчика СПАИ-2 представлен на рис. 2.

В датчике магнит 3, соединенный с наконечником 4, изолирован от корпуса 1 рабочим зазором  $\delta$  и технологическим зазором В. Корпус 1 и наконечник 4 через магнит 3 соединен с разъемом 20.

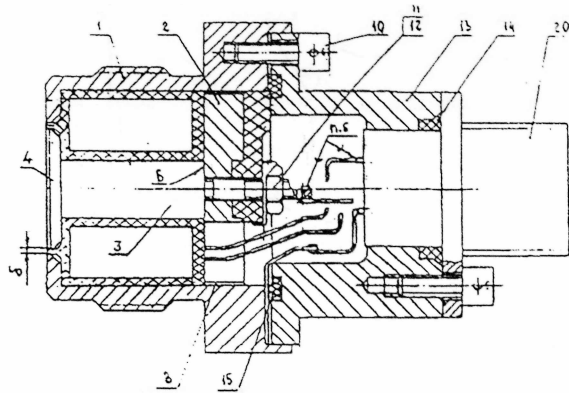


Рис. 2 Общий вид датчика СПАИ-2

Все детали магнитопровода датчика выполнены из отожженной электротехнической стали марки 10895. Постоянный магнит изготовлен из сплава 25Х15К.

Второй составляющей системы предупреждения аварийного износа является блок управления датчиком, который в процессе выполнения работы неоднократно дорабатывался. В результате была получена окончательная структурная схема блока управления. Более подробно описание СПАИ-2 и этапы ее разработки приведены в диссертации.

С целью определения работоспособности и чувствительности системы предупреждения аварийного износа были проведены ее лабораторные испытания.

Испытания проводились на установке УИМ АО «Авиадвигатель» (Рис. 3 ). В процессе испытаний использовали трансформаторное масло при температуре  $t_{\text{м}}=20-30^{\circ}\text{C}$ . Объем масла в маслосистеме установки был равен 30 л, скорость прокачки - 30 л/мин, давление масла на входе сепаратора частиц -  $0,7 \text{ кг/см}^2$ .

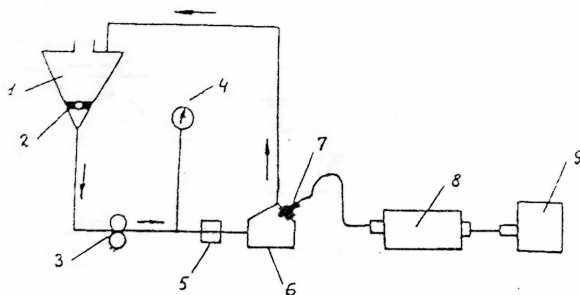


Рис. 3 Упрощенная схема установки

1 - маслобак; 2 - съемная магнитная ловушка; 3 - маслонасос; 4 - манометр;  
5 - расходомер; 6 - вихревой сепаратор стружки; 7 - датчик; 8 - электронный блок  
управления работой датчика; 9 - самописец

Для испытаний использовали просеянную стальную стружку, размеры и условные номера которой приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Обозначения и размеры стружки**

| Условный номер стружки | Размер стружки, мм |
|------------------------|--------------------|
| 0                      | до 0,05            |
| 1                      | 0,05.....0,10      |
| 2                      | 0,10.....0,15      |
| 3                      | 0,15.....0,25      |
| 4                      | 0,25.....0,50      |

Испытания включали в себя 5 одинаковых циклов, в каждом из которых использовали стружку одного номера в порядке возрастания номеров, начиная с нулевого. Каждый цикл испытаний включал в себя:

- очистку масла путем его прокачки в течение 15...20 минут через съемную магнитную ловушку, размещаемую в донной части маслобака установки;

- контрольную прокачку масла в течение 10...20 минут после съема магнитной ловушки (для определения остаточного фона ферромагнитного загрязнения масла);
- вбрасывание первой дозы 0,3 г стружки в маслобак установки с последующей прокачкой масла в течение 30 минут;
- вбрасывание второй дозы 0,3 г стружки в маслобак установки с последующей прокачкой масла в течение 20...40 минут;
- установку в маслобак магнитной ловушки для очистки масла.

Во время каждого цикла испытаний СПАИ-2 и самописец работали непрерывно. Моменты вбрасывания доз стружек и моменты установки в бак магнитной ловушки отмечали метками на диаграммной ленте самописца.

Результаты испытаний СПАИ-2 приведены на рис.4.

Графики, приведенные на рисунке отражают динамику реальных случайных процессов диспергирования и седиментации ферромагнитной стружки, вводимой в маслобак установки дискретными дозами. Видны особенности этих процессов, характерные для частиц различных размеров. Так, например, по мере увеличения размера частиц увеличивается скорость седиментации стружки.

Как показали исследования, проведенные фирмой «Tedeco» («Vickers»), эффективность вихревого сепаратора, который был использован при испытаниях, может достигать 100% при работе с частицами крупнее 150 мкм, но резко падает при уменьшении размеров частиц ниже 100 мкм. Это объясняет относительно низкую чувствительность СПАИ-2 к стружке № «0».

Лабораторные испытания опытного образца СПАИ-2 показали, что система работоспособна, имеет высокую чувствительность к стружке размером 50...500 мкм и обладает более широкими потенциальными возможностями по сравнению с применяемыми в настоящее время стружкосигнализаторами и системами индукционного типа.

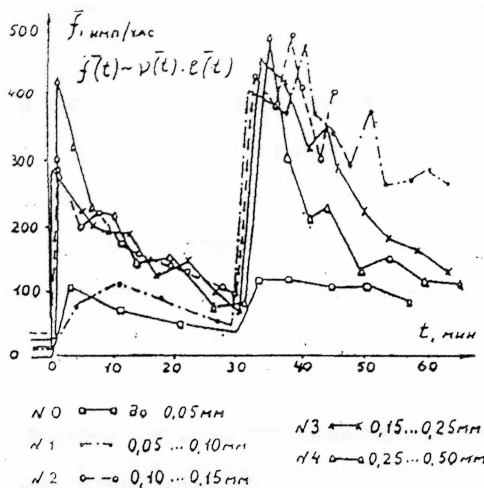


Рис. 4 Графики зависимости средней частоты сигналов СПАИ-2 от текущего времени циклов испытаний

СПАИ-2 имеет следующие преимущества по сравнению с системами QDM (фирма Tedeco, США) и MetalSCAN (фирма GasTOP, Канада) - основными системами, представленными на мировом рынке. (См. также таблицу 2).

- *Повышение качества диагностики состояния узлов*

Благодаря чувствительности датчика СПАИ к мелким частицам существенно расширяется круг контролируемых видов износа. Это позволяет поднять диагностику технического состояния контролируемых узлов на более высокий уровень.

- *Увеличение числа контролируемых узлов*

Благодаря способности в любой момент времени очищаться по запрограммированным командам датчик СПАИ может работать при высоких интенсивностях фона частиц нормального износа.

Это позволяет увеличить количество узлов трения, одновременно контролируемых одним датчиком.

Таблица 2

**Сравнение способностей датчиков систем контроля частиц износа в масле**

| Способности                                                                       | СПАИ                                     | QDM                                                | MetalSCAN                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1. Способность обнаруживать ферромагнитные частицы износа                         | + Размер (масса) больше 50 мкм (0,2 мкг) | + Размер (масса) больше 250 мкм (5 мкг)            | + Размер (масса) больше 320 мкм (8мкг) |
| 2. Способность обнаруживать неферромагнитные частицы износа                       | -                                        | -                                                  | + Размер частиц больше 450 мкм         |
| 3. Способность обнаруживать единичные массивные частицы                           | -                                        | +                                                  | +                                      |
| 4. Способность выявлять тренды                                                    |                                          |                                                    |                                        |
| - общего числа обнаруженных частиц                                                | +                                        | +                                                  | +                                      |
| - частоты появления частиц                                                        | +                                        | +                                                  | +                                      |
| - суммы наибольших размеров обнаруженных частиц                                   | +                                        | -                                                  | -                                      |
| - произведения среднего наибольшего размера частиц и средней частоты их появления | +                                        | -                                                  | -                                      |
| - общей массы обнаруженных частиц                                                 | -                                        | +                                                  | + грубо                                |
| 5. Способность собирать частицы износа для лабораторного анализа                  | +                                        | +                                                  | -                                      |
| 6. Способность самоочищаться от частиц износа                                     | +                                        | -Необходимы периодические съемы для ручной очистки | +                                      |

Пятая глава посвящена опыту применения комплексной трибодиагностики при эксплуатации и испытаниях авиационной техники.

Наиболее наглядно возможности трибодиагностики можно продемонстрировать при испытании отдельных узлов и агрегатов, при которых можно выявить частицы износа и законы изменения концентрации металлов в масле при определенных дефектах, возникающих в зонах контакта при трении.

В процессе ресурсных испытаний, эквивалентных 5000 часов, подшипника А176130Р КВД двигателя ПС-90А на стенде Т14-15/2 ЦИАМ проводилась комплексная трибодиагностика его состояния.

Целью проведения трибодиагностики являлась оценка динамики изменения технического состояния подшипника с увеличением его наработки, а также сравнение эффективности различных методов диагностики для такого типа подшипников и, следовательно, в целом двигателя ПС-90А.

В процессе испытаний подшипника для трибодиагностики его состояния производился периодический отбор проб масла объемом 150 мл. Интервал отбора проб масла составлял в период приработки 10 часов и после прохождения периода приработки 12 часов. Пробы масла отбирались на выходе из коробки с испытуемым подшипником.

В качестве оборудования для трибодиагностики использовались следующие приборы:

- фотоэлектрический спектрометр МФС;
- атомно-эмиссионный спектрометр БЭРД МОА;
- рентгено-спектральный анализатор "Спектроскан";
- бездифракционный рентгено-флуоресцентный анализатор БАРС-ЗДА;
- аналитический феррограф ОМ-1 с автоматическим устройством считывания феррограмм ДКС-1.

Для исследования состояния поверхностей деталей подшипника после проведения испытаний использовались бинокулярный микроскоп МБС-2 и растровый электронный микроскоп JSM 35-CF.

На построенных по результатам испытаний зависимостях изменения концентраций железа и меди для выбранных видов спектрометров и концентраций больших частиц  $D_L$  для феррографии от наработки подшипника наблюдались два периода работы подшипника: период приработки и период нормального износа, когда концентрации практически постоянны.

В конце второго периода только феррография показала четкое увеличение значения  $D_L$ . На феррограммах проб масла в конце испытаний были обнаружены сферические частицы износа, свидетельствующие об образовании на поверхностях усталостных микротрещин, т.е. начало процесса усталостного выкрашивания.

Это было подтверждено исследованием поверхностей шаров и дорожек качения на электронном сканирующем микроскопе.

Также было установлено, что величины концентраций железа и меди в масле на различных спектральных приборах зависят от типа прибора, особенно при больших значениях этих концентраций. Это обстоятельство можно объяснить следующим образом. При работе любого механизма в смазочном масле содержатся крупные и мелкие частицы износа, а кроме того металл может содержаться в масле в «растворенном» виде: соли металлов, образующиеся при срабатывании присадок, окислы металлов и ультрамелкодисперсные частицы износа.

Обычно «растворенный» металл не задерживается фильтрами, что приводит к его накоплению в масле в процессе работы механизма. Но «растворенный» металл не представляет интереса для трибодиагностики.

Различные типы приборов могут определять только какую-то часть металла, содержащегося в смазочном масле. Рентгеновские приборы определяют только частицы износа в размерном интервале 1–40 мкм и не измеряют металл в растворенном виде, фотоэлектрический спектрометр МФС измеряет растворенный металл и частицы износа размером менее 5 мкм, а атомно-

эмиссионный спектрометр МОА определяет как весь «растворенный» металл, так и полностью частицы размером до 10 мкм.

Этим и объясняется то, что спектрометр МОА дает наибольшие значения концентраций.

Феррография определяет только диагностически важные частицы.

Из сказанного выше следует, что при переходе в трибодиагностике техники с одного типа диагностического оборудования на другой необходимо производить пересчет критериев оценки технического состояния диагностируемого оборудования для нового типа приборов.

Методы комплексной трибодиагностики в ходе выполнения работы прошли апробацию при доводке механизма перестановки стабилизатора самолета ЯК-42, испытаниях авиационных турбохолодильников и эксплуатации двигателей Д-30КУ, КР и ПС-90А.

В шестой главе представлены исследования в области применения методов трибодиагностики для оценки смазывающей способности авиационных масел.

Целью работ, представленных в этой главе, являлась разработка методов количественной оценки указанных свойств масел с использованием методов и средств трибодиагностики.

Для достоверной оценки смазывающих свойств масел обычно используется редукторная установка Ш-3, условия работы масел в которой наиболее полно отражают условия работы в реальных двигателях. Продолжительность испытания масел на установке Ш-3 составляет 50 часов. Метод оценки смазывающей способности - визуальная оценка состояния поверхностей трения после испытаний.

Автором предложен метод количественной оценки противозносных и противозадирных свойств масел с продолжительностью испытаний не более 10 часов, сущность которого заключается в следующем.

Частицы износа, содержащиеся в смазочном масле узла трения, несут подробную и важную информацию о скорости и виде износа поверхностей трения, а, значит, и о смазывающих свойствах масла.

Анализ характеристик частиц, определяемых с помощью методов трибодиагностики может дать исчерпывающую информацию для оценки противозадирных и противоизносных свойств, а также позволяет следить за динамикой развития процессов изнашивания при применении различных масел.

Критерием оценки противоизносных свойств масел при их испытаниях на редукторных установках может служить скорость образования частиц износа при установившемся режиме изнашивания.

Скорость изнашивания узлов трения может быть представлена из выражения (2) в виде:

$$m = \gamma v V_0 [C - C_0(1 - qt)^{\gamma v/q}] / [1 - (1 - qt)^{\gamma v/q}],$$

При достижении равновесной концентрации  $C_p$ , которая определяется как предел концентрации при  $t \rightarrow \infty$

$$m = \gamma v V_0 C_p.$$

При оценке и сравнении двух масел 1 и 2 для скорости образования частиц износа в установившейся период можно записать:

$$m_1 = \gamma v_1 C_{p1} V_{01}; \quad m_2 = \gamma_2 v_2 V_{02} C_{p2}.$$

При кратковременных испытаниях (продолжительностью не более 5 часов) можно предположить, что  $\gamma_1 = \gamma_2$ . Учитывая, что при испытаниях масел 1 и 2  $v_1 = v_2$ ,  $V_{01} = V_{02}$ , получим соотношение:

$$C_{p1}/C_{p2} = m_1/m_2.$$

Таким образом, в качестве критерия оценки противоизносных свойств масел на редукторной установке может использоваться равновесная концентрация частиц износа в масле при установившемся режиме изнашивания, когда скорость образования частиц износа постоянна. Результаты оценки

противоизносных свойств двух масел на установке Ш-3 по предложенному методу представлены на рис. 5.

Чем ниже значения этих концентраций, тем лучше противоизносные свойства - противоизносные свойства масла (2) лучше, чем у масла (1). Противоизносные свойства масел оцениваются при ступенчатом повышении контактной нагрузки и определяются ее значением, при котором начинается непрерывный рост концентрации частиц износа,  $C_{кр}$ . В работе экспериментально показано, что критерием оценки противоизносных свойств может также служить максимальная концентрация частиц в период приработки.

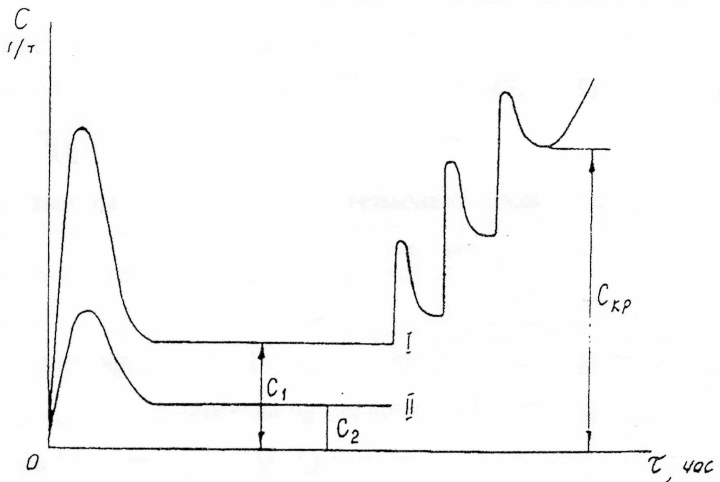


Рис. 5 Зависимость концентрации продуктов износа в масле от времени работы установки Ш-3 для двух масел (1) и (2)

При разработке метода оценки противопиттинговых свойств масел автор исходил из следующих предположений.

Питтинг и кавитационная эрозия смазываемых поверхностей трения имеют усталостную природу и одинаковый порядок и характер разрушения: пластическое деформирование поверхности, образование на поверхностях краевых усталостных микротрещин с последующим выкрашиванием

поверхностей и отличаются только способом воздействия на изнашиваемую поверхность.

За основу предлагаемого в настоящей работе метода оценки противопиттинговых свойств масел был выбран метод исследования кавитационной эрозии в тонких жидких пленках, но в качестве критерия оценки использовалась концентрация частиц износа в масле.

На рис. 6 представлена принципиальная схема установки для оценки способности масел противостоять кавитационной эрозии при вибрационной кавитации в тонкой смазочной пленке. Испытуемое масло заливается в бачок 2. Наконечник вибратора УЗДН-2Т 1 устанавливается против шарика диаметром 12,7 мм с зазором. Величина зазора регулируется с помощью лимба 8 и фиксируется фиксатором 10. При проведении предварительных экспериментальных исследований использовались шарики из сталей ЭИ-347 и ШХ-15 и меди, наконечник изготовлен из титана ВТ-3-1.

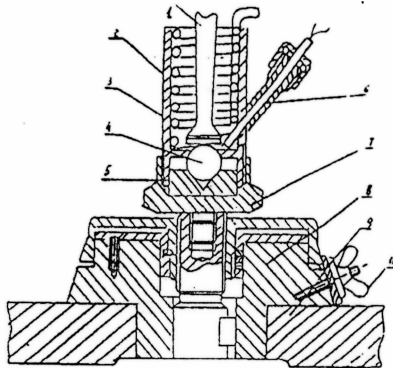


Рис. 6 Принципиальная схема установки для оценки способности масел противостоять кавитационной эрозии

Измерение температуры масла в зазоре между шариком и наконечником производится термопарой 6. Так как при вибрации наконечника выделяется большое количество тепла, в схеме установки предусмотрен водяной

холодильник, с помощью которого производится поддержание необходимой по условиям эксперимента температуры.

При вибрации наконечника (с частотой 22 КГц) около поверхности шарика при определенных условиях в зазоре возникает явление вибрационной кавитации, которое приводит к разрушению поверхностей шарика и наконечника. Интенсивность этого разрушения зависит от типа испытуемого масла и может служить критерием оценки его способности противостоять кавитационной эрозии и противопиттинговым свойствам.

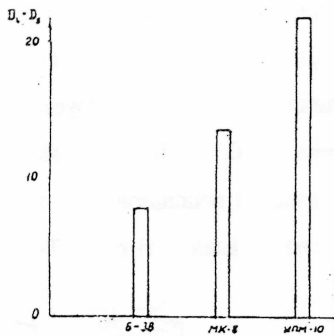


Рис. 7 Результаты оценки способности масел противостоять кавитационной эрозии поверхностей трения в тонкой смазочной пленке на вибрационной установке. Материал шарика - сталь ЭИ-347

На рис. 7 приведены результаты экспериментальной оценки противопиттинговых свойств некоторых авиационных масел.

В работе также представлены результаты подбора присадок к маслам, способствующих улучшению противопиттинговых свойств масел.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа опыта эксплуатации и результатов проведенных испытаний авиационных двигателей Д-30КУ, ПС-90А, АЛ-31 и агрегатов обоснована необходимость комплексного подхода к трибодиагностике с

одновременным использованием феррографического и спектрального анализа продуктов износа в масле. Повышение объема информации о процессах изнашивания смазываемых узлов трения, получаемой при этом, позволяет более достоверно оценивать их техническое состояние, что приобретает особую важность при переходе на эксплуатацию техники по состоянию. Предложенный комплексный подход к трибодиагностике может найти применение не только в авиации, но и других отраслях техники.

2. Предложена экспериментально подтвержденная математическая модель, определяющая динамику изменения концентрации частиц износа в масле в зависимости от интенсивности изнашивания узлов трения и параметров маслосистемы, для различных типов маслосистем двигателей и агрегатов.

3. На основании проведенных экспериментальных исследований предложена гипотетическая модель образования сферических частиц износа в усталостных микротрещинах на поверхностях трения при качении, появления и увеличения количества сферических частиц износа является диагностическим признаком начала процесса усталостного выкрашивания.

Экспериментально установлено, что сферические частицы образуются не только при развитии усталостных микротрещин в подшипниках качения, но и в зубчатых зацеплениях в области делительной окружности шестерен. Диаметр этих частиц в зубчатых зацеплениях составляет 5-15 мкм, в то время, как в подшипниках качения диаметр сферических частиц, появляющихся в масле при образовании на телах качения усталостных микротрещин, не превышает 5 мкм.

4. Выдвинуто предположение, что в условиях гидродинамической смазки, при нагрузках и скоростях относительного перемещения поверхностей трения, реализуемых в узлах трения ГТД, основной вклад в развитие усталостного выкрашивания вносят кавитационная эрозия контактирующих поверхностей.

Разработана модель развития усталостных микротрещин на поверхностях трения в условиях гидродинамической смазки, которая является преобладающим видом смазки узлов авиационных двигателей и агрегатов. Согласно этой модели

основной вклад в интенсивность развития микротрещин, наряду с расклинивающим действием смазки, вносят кавитационные явления в микротрещинах.

5. Разработан метод исследования кавитационной эрозии в тонких смазочных пленках для оценки ее интенсивности с применением методов и средств трибодиагностики (А.С. № 1422112 от 08.05.88 г.).

Проведены экспериментальные исследования влияния свойств масел и условий эксплуатации на интенсивность кавитационной эрозии поверхностей трения и проведена оценка возможности создания присадок к маслам, снижающих интенсивность кавитационного изнашивания. Метод позволяет оценивать динамику кавитационной эрозии в зависимости от условий эксплуатации масла.

6. Предложен новый принцип действия самосбрасывающего, магнитоуправляемого, контактного датчика количества частиц износа в масле, в котором критерием оценки количества частиц является частота срабатывания датчика (сброса частиц износа), на основании которого разработана, изготовлена и испытана принципиально новая бортовая система предупреждения аварийного износа смазываемых узлов трения ГТД СПАИ-2 (патент № 2131552 от 10.06.99 г.), позволяющая выявлять дефекты на ранней стадии их развития, исключить ложные срабатывания системы предупреждения аварийного износа.

7. Предложен новый принцип подачи пробы масла на феррограмму, в отличие от зарубежных аналогов исключающий потерю информации при приготовлении феррограмм (А.С. № 1691714 от 15.07.91 г.), на основании которого разработаны и внедрены в эксплуатацию ГТД два поколения отечественных аналитических феррографов.

Разработаны метод и прибор для оценки интенсивности изнашивания при анализе феррограмм.

8. Разработаны атласы частиц износа для двигателей Д-30КУ, КП, ПС-90А и АЛ-31, позволяющие производить оценку технического состояния указанных

двигателей при применении для трибодиагностики феррографического анализа масла.

9. Разработаны инструментальные методы исследования противоизносных и противозадирных свойств масел с использованием для оценки интенсивности изнашивания принципов трибодиагностики, а также универсального измерителя параметров металлического контакта (А.С. № 1635068 от 15.11.90 г.), позволяющие сократить время проведения испытаний, исследовать динамику изменения указанных свойств при изменении условий эксплуатации, что невозможно осуществить ранее известными методами.

10. Разработанные методы и средства трибодиагностики внедрены в ОАО «Аэрофлот», а/к «Внуковские авиалинии», ЛИИ им. М.М.Громова, НПО им. В.Я.Климова, МВЗ им. М.Л.Миля, НИИВВС, РАО «ГАЗПРОМ».

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Степанов В.А., Захаров В.Н. Метод исследования смазывающей способности масел на приборе ПТВР// Эксплуатационные свойства авиационных топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей. Тр. V ВНТК: - Киев, 1981. - С. 54-56.

2. Степанов В.А., Захаров В.Н. Опыт применения феррографии для диагностики технического состояния авиационных агрегатов// Опыт применения и перспективы развития диагностики состояния авиадвигателей в эксплуатации. Тр. Межотраслевой науч.-техн. конф.: - М., 1984. - С. 16-18.

3. Степанов В.А., Саверин М.М. Образование сферических частиц при усталостном разрушении зубьев шестерен// Несущая способность и качество зубчатых передач и редукторов машин. Тр. ВНТК: - Алма-Ата, 1985. - Ч. 2. - С. 102-104.

4. Некоторые аспекты исследования противоизносной эффективности масел и присадок/ Ю.С.Заславский, С.П.Авдеенко, В.А.Степанов и др.// Химия и технология топлив и масел. - 1985, № 12. - С. 37-42.

5. Степанов В.А. Соотношение между концентрацией частиц износа в масле и скоростью износа узла подшипников авиационных турбохолодильников с фитильной системой смазки. - М., 1986. - С. 1-4. - (Тр. ЦИАМ; № 1159).

6. Степанов В.А., Калашников С.И., Угрюмов В.С. Применение феррографического и рентгено-спектрального методов для диагностики технического состояния авиационных турбохолодильников по содержанию частиц износа в смазочном масле. - М., 1986. - С. 5-8. - (Тр. ЦИАМ; № 1159).

7. Степанов В.А. Метод оценки противоизносных свойств авиационных масел. - М., 1986. - С. 9-12. - (Тр. ЦИАМ; № 1159).

8. Степанов В.А., Саверин М.М. Образование сферических частиц при усталостном изнашивании в зубчатых передачах// Авиационная промышленность. - 1987. - № 1. - С. 39-42.

9. Степанов В.А., Макеев Ю.К. Методы количественного анализа состава продуктов изнашивания в масле при контроле технического состояния ГТД// Проблемы повышения надежности эксплуатации смазываемых узлов трения авиационной техники. Тр. 2-й ВНТК: - М., 1987. - С. 63-65.

10. А.с. 422112 СССР. Способ определения способности масел противостоять кавитационной эрозии/ В.А.Степанов, А.А.Масленников, А.Ф. Финашов // Открытия. Изобретения. Офици. бюл. Гос. ком. по делам изобрет. - 1988. - № 33.

11. Степанов В.А., Петров С.Н. Феррографический метод диагностики технического состояния узлов трения авиационных ГТД, смазываемых маслом// Контроль и диагностика общей техники. Тр. 2-й междунар. науч.-техн. конф. : - М., 1989. - С. 31-34.

12. А.с. 635068 СССР. Способ определения противоизносных и противозадирных свойств масел / В.А.Степанов, В.В.Пантелеев, А.Ф.Финашов, В.Н.Захаров// Открытия. Изобретения - Офици. бюл. Гос. ком. по делам изобрет. - 1991. - №10.

13. Kedrinskii V.K., Stepanov V.A. Cavitation effects in thin films// Proceedings of 12th ISNA/ Ed. by M.F. Hamilton and D.T. Blackstock. - L.: Elsevier Science Publishers Ltd, 1990. - P. 471-475.

14. А.с. 1691714 СССР. Устройство для подачи пробы жидкости к феррографу / В.А.Степанов, С.Н.Петров, И.Ф.Тулупов и др.// Открытия. Изобретения. - Офиц. бюл. Гос. ком. по делам изобрет. - 1991. - № 42.

15. Stepanov V.A. The experience of using the complex methods of physical and chemical of fuel during tribodiagnostics of a gas-turbine// Condition Monitoring -91. Internat. Conf.: - Erding, (Germany), 1991. - P. 217-223.

16. Степанов В.А., Гержа Т.В., Калиновская Н.И. Результаты исследования по разработке методологии контроля технического состояния ГТД по содержанию продуктов износа в масле.// Высокое качество и надежность машиностроительной продукции - через исследования, контроль и диагностику. Тр. науч.-техн. конф.: - М., 1991. - С. 71-75.

17. Механизм действия присадок в маслах при кавитационной эрозии стали/ Г.И.Шор, А.А.Масленников, В.А.Степанов и др. // Химия и технология топлив и масел. - 1991. - № 12. - С. 9-11.

18. Степанов В.А., Гержа Т.В., Серегин В.В. Повышение достоверности диагностирования технического состояния смазываемых узлов трения турбомашин на основе комплексного метода анализа масла // Газовая промышленность. Транспорт и подземное хранение газа. - 1993. - № 9-12. - С. 12-15.

19. Stepanov V.A., Gerzha T.V., Calinovskaya N.I. Development of Portable Roentgenospectral Analysers Intended to Diagnose a Technical Condition of the Gas Turbine Engines// Condition Monitoring-94. Internat. Conf.: - Swansea, (UK), 1994. - P. 271-279.

20. Stepanov V.A. Method for estimating the antiwear and antiscuffing oil properties on the gearbox rig with the use of ferrography means and wear debris

concentration sensors// TRIBOS-94. Internat. Conf.: - Buenos Aires, (Argentina), 1994. - P. 211-219.

21. Зарицкий С.П., Степанов В.А., Тулупов И.Ф. Система комплексной трибодиагностики смазываемых узлов трения турбомашин// Конверсия в машиностроении. - 1995. - № 1. - С. 17-19.

22. Методы, средства и опыт диагностики авиационных газотурбинных двигателей/ О.Н.Фаворский, И.В.Егоров, В.А.Степанов и др. // Газовая промышленность. - 1995. - № 8. - С. 9-13.

23. Зарицкий С.П., Степанов В.А., Тулупов И.Ф. Сравнительный анализ характеристик датчиков систем контроля содержания частиц износа в масле// Энергодиагностика-95. Тр. Междунар. конф.: - М., 1995. - Т. 3. - С. 293-306.

24. Stepanov V.A., Touloupov I.F. Hazardous Wear Prevention System for Friction Units of Gas Turbine Engine// Integrated Monitoring & Failure Prevention. Internat. Conf.: - Mobil, (Alabama, US), 1996. - P. 493-501.

25. Stepanov V.A., Touloupov I.F. Debris Monitoring System with Self-cleaning Contact Sensor// Condition Monitoring-97. Internat. Conf.: - Xi'an, (China), 1997. - P. 163-170.

26. Использование авиационных технологий для обеспечения безопасности и повышения эффективности эксплуатации газотурбинных установок/ О.Н.Фаворский, В.А.Скибин, Ю.А.Ножницкий и др. // Энергодиагностика-98. Тр. Междунар. конф.: - М., 1998. - Т. 3. - С. 16-36.

27. Степанов В.А., Тулупов И.Ф., Каджардузов П.А. Система мониторинга частиц износа с самоочищающимся контактным датчиком// Энергодиагностика-98. Тр. Междунар. конф.: - М., 1998. - Т. 3. - С. 3-9.

28. Патент 2131552 РФ. Устройство для обнаружения ферромагнитных частиц износа в масле./ - В.А.Степанов, И.Ф.Тулупов, П.А.Каджардузов, Д.Ф.Дмитриев// Изобретения. - Офиц. бюл. Рос. агентства по патентам и товарным знакам. - 1999. - № 16.

