

На правах рукописи



Ходунаев Александр Юрьевич

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И АППАРАТНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННЫХ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
СВЧ-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ**

Специальность 2.2.8. —
«Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск — 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «ИРННТУ».

Научный руководитель: **Иванов Николай Аркадьевич**
кандидат физ.-мат. наук,
ФГБОУ ВО «ИРННТУ»,
доцент

Официальные оппоненты: **Шабанова Елена Владимировна**,
доктор физ.-мат. наук,
ИГХ СО РАН,
старший научный сотрудник

Эрбес Анна Сергеевна,
кандидат технических наук,
ОмГУПС (ОмИИТ),
старший преподаватель

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение
«Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова»,
г. Москва.

Защита состоится 13 июня 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.01 созданного на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира 11, главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на сайте <https://www.omgtu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира 11, главный корпус, П-202, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.01.

Тел. +7 (3812) 65-24-79, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Автореферат разослан _____ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.350.01,
кандидат технических наук,
доцент



Завьялов С. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Согласно статистике ГосЦентра безопасности полетов воздушных судов, до 40% инцидентов в воздухе связаны с двигателями. Из них 30-40% - с узлами и агрегатами, омываемыми смазочным маслом. Это приводит к возникновению чрезвычайных ситуаций и снижению эффективности эксплуатации авиационной техники. Поэтому проблема обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) в настоящее время является актуальной.

Контроль узлов и агрегатов, омываемых смазочным маслом, производится по величине параметров частиц износа бортовыми и наземными средствами контроля.

В качестве бортовых средств используются различные фильтры-сигнализаторы, магнитные пробки, датчики частиц проточного типа. По оценкам российских и зарубежных специалистов при обнаружении металлических частиц на магнитных пробках сложно принять решение по планированию технического обслуживания. Сложно принять решение и по показаниям датчиков непрерывного контроля, поскольку величина сигнала, снимаемого с датчика, зависит от формы частицы и траектории ее движения. При этом минимальный диаметр частицы, определяемой датчиками, составляет 250 мкм и более, что затрудняет выявление повреждения на ранней стадии развития.

Для выявления повреждения на ранней стадии предназначены наземные (лабораторные) средства контроля. Однако, по данным ПАО «ОДК-Сатурн», лишь 5-7% двигателей из исследованных с помощью лабораторных методов (атомно-эмиссионные, рентгенофлуоресцентные и т.д. методы) отстраняются от эксплуатации при превышении контрольных значений количества металлической примеси в пробе масла. Опыт АО «ОДК-Авиадвигатель» свидетельствует, что по результатам измерения частиц износа с помощью атомно-эмиссионного и феррографического методов на земле ни разу не было выявлено повреждение подшипника турбины высокого давления (ТВД).

Таким образом, используемые наземные средства и методы диагностики в подавляющем большинстве случаев не способствуют выявлению повреждения на начальной стадии развития и локализации поврежденного узла. Это связано, в основном, с двумя факторами: небольшое число параметров, используемых при принятии диагностического решения (чаще всего, величина массовой доли железа и меди) и неучет параметров частиц, накапливаемых на основном маслофильтре.

В Иркутском государственном университете более тридцати лет разрабатывается атомно-эмиссионный СВЧ-плазменный

(сцинтилляционный¹) метод элементного анализа, основанный на регистрации вспышек (сцинтилляций) атомизированного вещества под воздействием источника возбуждения спектров.

В описываемом методе материал пробы преобразуется в аэрозоль и попадает в источник возбуждения спектров — воздушную плазму веретенообразной формы с максимальной температурой 5200 К. Подача пробы организована таким образом, чтобы крупные частицы примеси попадали в плазму последовательно, по одной, формируя при этом разделенные по времени импульсы (соблюдается так называемый «принцип сцинтилляции»). Вещество пробы атомизируется, возникающее при этом излучение фокусируется собирающей линзой и попадает в полихроматор, присоединенный к нескольким фотоумножителям. Сигнал с фотоумножителя передается через преобразователь ток-напряжение и оцифровывается на персональном компьютере.

Лабораторным образцом СВЧ-плазменного спектрометра могут быть определены массовая доля элемента, число частиц с включением определённого элемента, средний размер частиц с включением определённого элемента и другие параметры металлической примеси в пробе для 16 элементов одновременно. Пределы обнаружения примеси в форме частиц находятся на уровне 0.01 млн^{-1} . Последнее обстоятельство позволяет обнаруживать в частицах износа легирующие элементы сплавов, используемых при производстве узлов трения.

Таким образом, метод отвечает требованиям, обеспечивающим принятие достоверного диагностического решения.

Степень разработанности темы. Основоположником сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектроскопии считается Б. Бинек (Bedřich Binek). Запатентованное им устройство использовалось для анализа воздуха на предмет загрязнений твердыми частицами. Метод в дальнейшем развивался Г. Лоренцем. Райхбауму Я. Д. принадлежит идея использовать метод для определения состава и размеров частиц благородных металлов в порошковых пробах. Способы введения порошков в плазму изучались в работах Крестьянинова А. Г., Копейкина Ю. А., Жеенбаева А. С. и др. Закономерности испарения аэрозоля в дуговой плазме изучались Райхбаумом Я. Д., Малых В. Д., Лужновой М. А., Симоновой В. И., Морозовым В. Н. и другими исследователями. В дальнейшем использование сцинтилляционного метода для анализа благородных металлов развивалось Васильевой И. Е., Шабановой Е. В., Лабусовым В. А., Сабировым Х. С., уже упомянутыми и другими исследователями. Для анализа продуктов износа в авиационных маслах

¹В работах некоторых исследователей, неверно упоминается связь метода со свойствами сцинтилляторов, впервые исследованных Круксом. Из-за возникшей терминологической путаницы, с 2015 года в работах исследователей ИГУ метод называется СВЧ-плазменным

метод впервые применяется в конце 90-х гг. в работах Алхимова А. Б., Зарубина В. П., Морозова В. Н., Казмирова А. Д. В работе Гайдая М. С., Дрокова В. Г., Казмирова А. Д., Овчинина Н. Н., Скудаева Ю. Д. разработана технология определения технического состояния авиационных двигателей по продуктам смыва с основного маслофильтра.

К 2015 г. разработка СВЧ-плазменного метода остается на стадии лабораторного образца. К этому моменту всё ещё существует ряд научных и технических вопросов, осложняющих внедрение прибора в эксплуатацию:

1. Так как метод традиционно использовался для анализа порошковых проб, отсутствует надёжный способ введения жидкой пробы отработанного авиационного масла в СВЧ-плазменный спектрометр. Плазменное образование спектрометра имеет веретенообразную форму с диаметром высокотемпературной зоны 6 мм. Исходя из соображений снижения влияния способа ввода пробы на метрологические характеристики спектрометра, к распылителю предъявляются следующие требования, обозначенные как требования для качественного ввода пробы:

- направленность — подача аэрозоля в виде узкой струи (2 мм) вдоль приосевой зоны плазменного образования;
- равномерность — отсутствие разрывов и пульсаций струи аэрозоля;
- скорость подачи пробы от 100-120 мкл/мин;
- диаметр капель 15-25 мкм — соответствует максимуму распределения по размерам (15-25 мкм) частиц износа в пробах отработанного масла исправных авиационных двигателей;
- коэффициент вхождения пробы более 80%;
- расход транспортирующего газа 0.20 ± 0.02 л/мин;
- отсутствие гистерезиса измеряемых величин — доля остаточного числа частиц совокупно по элементам не более 5%.

Проведённые испытания показали, что существующие промышленные распылители вязких жидкостей не удовлетворяют поставленной совокупности требований. Поэтому возникает необходимость в разработке оригинальной конструкции распылителя;

2. В порошковых пробах металлическая примесь в виде частиц диаметром менее 2 мкм (при приведении формы частицы к сфере) дает сигнал, не превышающий фоновый уровень плазмы и регистрирующей аппаратуры. Иными словами, не учитывается. Однако, в жидких пробах авиационных масел массовая доля такой формы примеси может превышать 50%. Как следствие, её неучет в этом случае может оказывать влияние на достоверность принятия диагностического решения. Вопрос может быть решен путем разработки способа отдельного измерения массовой доли элемента в двух формах — в форме крупных частиц износа диаметром более 2 мкм, а также в форме раствора и частиц диаметром 2 мкм или менее (далее по тексту — в форме растворённой примеси);

3. СВЧ-плазменным методом определяется более 40 диагностических параметров. Из-за большого числа параметров и наличия случайных факторов проблемой является принятие диагностического решения. Поэтому необходим поиск алгоритмов, позволяющих автоматизировать этот процесс.

Целью диссертационного исследования является повышение достоверности контроля омываемых смазочным маслом узлов трения авиационных газотурбинных двигателей при использовании СВЧ-плазменного метода за счет применения новых технических средств, алгоритмов и программ обработки данных.

Объектом исследования выступает СВЧ-плазменный метод.

Предметом исследования является применение СВЧ-плазменного метода для контроля узлов трения авиационных ГТД, омываемых смазочным маслом.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка ультразвукового устройства и способа распыления отработанных авиационных масел, обеспечивающего формирование протяженного потока аэрозоля без разрывов и пульсаций;
2. Исследование работы предложенного ультразвукового распылителя в составе системы подачи пробы СВЧ-плазменного спектрометра;
3. Разработка способа выделения и обработки аналитического сигнала от примеси в пробе, находящейся в форме частиц размером более 2 мкм и в форме растворённой примеси;
4. Разработка алгоритма и программного обеспечения для автоматизации принятия диагностического решения по результатам измерения параметров частиц износа в пробах смазочных материалов авиационных двигателей.

Методология и методы исследования. Для решения задач диссертационной работы использовались основные положения теории вероятностей и математической статистики, методы решения дифференциальных уравнений, теория нечетких множеств, методы математической физики, методы машинного обучения, методы атомно-эмиссионного анализа. Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием пакета `scipy`; использовались алгоритмы машинного обучения в составе пакета `scikit-learn` на языке программирования `python`.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с **паспортом по специальности 2.2.8.** — «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Научная новизна:

1. Впервые разработана конструкция ультразвукового распылителя на основе поперечных колебаний распыляющего капилляра для ввода пробы в воздушную плазму СВЧ-плазменного спектрометра, удовлетворяющая требованиям для качественного ввода пробы;
2. Впервые предложен способ автоматизированного измерения капель получаемого распылителем аэрозоля. Капли осаждаются в поверхностно-активное вещество и фотографируются. Диаметр капель (в диапазоне 5-100 мкм) определяется посредством автоматической обработки фотоснимков. Способ отличается от существующих получением капель в виде ровных сфероидов, простотой применения и отсутствием необходимости в дорогостоящем оборудовании;
3. Впервые теоретически исследованы и смоделированы колебания распыляющего капилляра ультразвукового распылителя в системе подачи пробы СВЧ-плазменного спектрометра в зависимости от режима работы ультразвукового генератора. Капилляр смоделирован в виде стержня, закрепленного на опоре, подверженной действию гармонической вынуждающей силы. Получена зависимость соотношения колебаний свободного конца и опоры от частоты колебаний опоры и параметров капилляра. Показано, что для любой фиксированной частоты колебаний можно подобрать такую длину капилляра, при которой соотношение колебаний свободного конца и опоры формально обращается в бесконечность.

Практическая значимость:

1. Предложена оригинальная конструкция ультразвукового распылителя для системы подачи пробы СВЧ-плазменного спектрометра, удовлетворяющая требованиям для качественного ввода пробы;
2. Конструкция распылителя и программное обеспечение по выделению непрерывного и импульсного сигналов использованы в составе опытно-промышленного образца СВЧ-плазменного анализатора, поставленного в АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь;
3. Предложен способ и программное обеспечение для измерения диаметра капель получаемого распылителем аэрозоля по фотографиям при осаждении в поверхностно-активное вещество. Диапазон измерений составляет от 5 до 100 мкм. Способ отличается от существующих получением капель в виде ровных сфероидов, простотой применения и отсутствием необходимости в дорогостоящем оборудовании;

4. Предложен способ автоматизированной оценки технического состояния узлов трения маслосистемы авиационных ГТД Д30КП/КП-2 по результатам СВЧ-плазменных измерений параметров примеси в пробах смыва с основного маслофильтра при использовании «случайного леса», алгоритма машинного обучения;
5. Предложенный способ автоматизированной оценки технического состояния был использован для оценки т/с маслосистемы двигателей Д-30КП/КП-2 после проведения приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) в ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск;
6. Разработаны программа и методичное пособие по обучению специалистов предприятий авиационного комплекса при диагностировании двигателей по результатам СВЧ-плазменных измерений;
7. Проведённые усовершенствования СВЧ-плазменного спектрометра обеспечивают возможность проведения НИОКР по разработке и выпуску опытно-промышленной партии прибора.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ распыления жидких проб для СВЧ-плазменного спектрометра. В рамках способа выполняются требования для качественного ввода пробы и обеспечивается замена насадки акустического волновода или распыляющего капилляра за 5-10 минут;
2. Математическая модель изгибных колебаний стержня, один конец которого свободен, а другой закреплён на опоре, подверженной воздействию гармонической вынуждающей силы. Модель позволяет подобрать параметры стержня и условия колебаний таким образом, чтобы соотношение амплитуд колебаний свободного конца стержня и опоры было максимальным;
3. Способ и программное обеспечение для автоматизированного измерения капель смазочного масла по фотоснимкам при осаждении их на поверхностно-активное вещество. Способ позволяет проводить измерение диаметра капель смазочного масла в диапазоне от 5 до 100 мкм без применения дорогостоящего оборудования;
4. Алгоритм и способ отдельного выделения непрерывного и импульсного сигналов при СВЧ-плазменных измерениях, позволяющий проводить измерение параметров примеси в пробах, содержащих вещество как в форме частиц более 2 мкм, так и в форме растворённой примеси. Измерение массовой доли элемента в форме растворённой примеси позволяет определить наличие повреждения узлов трения двигателя в случаях, когда повреждение сопровождается избыточным выделением в масло

частиц износа диаметром менее 2 мкм. Возможность учета этих случаев повышает достоверность диагностирования;

5. Алгоритм и способ автоматизированного принятия диагностического решения по результатам СВЧ-плазменных измерений параметров примеси в пробах смывов двигателей Д30КП/КП-2(КУ-154). Алгоритм определяет состояние «в норме», «особый контроль», «поврежден» для отдельной пробы, и результат совпадает с результатом экспертной оценки в среднем в 67% случаев.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректым применением современного математического аппарата, постановкой дополнительных экспериментов для исследования параметров получаемого аэрозоля, измерения параметров металлической примеси в пробах отработанных масел авиационных двигателей, проверкой независимыми методами, статистической обработкой полученных данных.

Полученные результаты теоретически и экспериментально обоснованы, а их достоверность подтверждается:

- сходимостью аналитических решений поставленных научных задач с результатами полунатурных и натуральных экспериментов;
- метрологическими возможностями оборудования, его аккредитацией в Госстандарте;
- внедрением полученных автором решений в конкретные разработки и образцы техники;
- соблюдением правил составления и тестирования вычислительных программ и алгоритмов.

Апробация работы. Основные результаты и выводы диссертации были доложены на следующих конференциях: X и XII Международная конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 2018 и 2019 г.); Международная молодежная научная конференция «XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2013 г.); Научно-техническая конференция «АВИАДВИГАТЕЛИ XXI Века» (Москва, 2015 г.); VIII и X научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов её эксплуатации» (Иркутск, 2015 и 2017 г.).

Основные результаты по теме диссертации изложены в 19 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК при министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Личный вклад. Автором лично получены описанные в диссертации результаты, в частности: предложены технические решения для создания конструкции ультразвукового распылителя; разработана математическая модель распыляющего капилляра распылителя как стержня, подверженного изгибным колебаниям; исследованы параметры работы распылителя при различных условиях; разработаны алгоритмы

и программное обеспечение для измерения капель жидкости по фотографиям, выделения сигналов при СВЧ-плазменных измерениях, а также для автоматизации принятия диагностического решения.

Реализация работы. Разработанный алгоритм и программное обеспечение входят в программное обеспечение СВЧ-плазменного анализатора САМ-ДТ-01-2. Аттестована методика измерений массовой доли в форме растворённой примеси для магния, железа, меди (свидетельство об утверждении типа средств измерений рег. № 64278-16). Новизна результатов научной работы подтверждена патентами РФ № 128521 «Ультразвуковой распылитель» от 27.05.2013; № 2711372 «Способ измерения размера капель масла» от 10.12.2020.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 107 страниц, включая 13 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 117 наименований.

Диссертация подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ с использованием результатов работ, выполненных в рамках Федеральной целевой программы «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России 2014-2020 годы» по теме «Разработка и создание программно-аппаратного СВЧ плазменного комплекса для мониторинга, контроля и безопасной эксплуатации маслосистемы двигателей наземного и воздушного назначения». Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57718X0289.

Эта работа была поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках научно-образовательного центра "Байкал" (Грант № FZZS-2021-0007).

Содержание работы

В главе 1 проанализированы сведения об используемой в России и за рубежом аппаратуре, применяемой для оценки технического состояния узлов и деталей авиационных двигателей, омываемых смазочным маслом.

Перспективными на данный момент считаются средства непрерывного контроля, в частности, датчики проточного типа, позволяющие получать информацию о техническом состоянии в режиме онлайн. Однако, большинство разработанных проточных датчиков и счетчиков частиц, основанных на оптическом, ультразвуковом, электрическом и других способах действия, не предназначено для условий эксплуатации в маслосистеме авиационных газотурбинных двигателей, при которых скорость потока масла составляет порядка 40–60 л/мин, а диаметр потока — 20–25 мм. При таких условиях искажаются показания и ограничивается чувствительность датчиков к диаметру регистрируемых

частиц. Достоверный предел обнаружения по диаметру частиц для таких устройств превышает, как правило, 200 мкм для ферромагнитных сплавов. Для своевременного обнаружения повреждения на ранней стадии развития требуется более низкий предел обнаружения частиц по размерам.

Таким образом, несмотря на очевидные достоинства онлайн диагностики, создание диагностического подхода, не зависящего от типа развития повреждения, на данный момент является аппаратурно ограниченным.

Наземные средства контроля технического состояния позволяют получить более обширную информацию о параметрах частиц износа и предназначены для выявления повреждения на ранней стадии. Однако, практика использования традиционной атомно-эмиссионной и рентгеноспектральной аппаратуры показала, что выявление повреждения по превышению содержания частиц износа в пробе масла происходит лишь для 5-7% двигателей. Основные причины низкой достоверности результатов диагностики с помощью традиционной аппаратуры связаны с малым числом определяемых параметров примеси в пробе масла, невысокой чувствительностью методов. Кроме того, не учитывается форма нахождения металлической примеси в пробе, параметры частиц, накопленных на основном маслофилт্রে, а также присадки, как источник находящихся в маслосистеме химических элементов (например Si, Mo).

Математическая постановка задачи диссертационного исследования связана с общей задачей диагностирования и формулируется следующим образом.

Пусть состояние узлов трения маслосистемы ГТД может быть полностью описано независимыми параметрами состояния

$$\omega_{\text{ГТД}} = x_1, x_2, \dots, x_n \quad (1)$$

При этом существуют измеряемые (с погрешностью $\Delta_i^* \in \Delta^*$) функции состояния s_i , с помощью которых может быть получена оценка x_i^* параметров состояния с некоторой ошибкой $\Delta_i \in \Delta$:

$$|x_i - x_i^*(s_1, s_2, \dots, s_m)| \leq \Delta_i \quad (2)$$

Диагностировании узлов трения маслосистемы ГТД аналитическими методами производится по величине параметров продуктов износа в пробах масла и/или смыва с маслофилт্রে, накопленных от нескольких источников частиц износа за определенное время.

При таком накоплении информация о конкретных источниках частиц износа и соответствующих им параметрах состояния может быть утрачена. Как следствие, в общем случае, для функций состояния ни условие независимости, ни условие полноты относительно параметров состояния выполнено не будет и значение Δ_i может быть достаточно велико, чтобы сделать диагностику безрезультатной.

Тем не менее, существуют частные случаи, при которых эти условия могут выполняться. В идеальном случае, когда i -ый источник частиц износа выделяет частицы строго из i -го материала, а диагностический метод позволяет выделить из частицы i -ый материал в отдельности, для соответствующих параметров состояния условие независимости будет выполняться. В случае, если это возможно для каждого из n материалов, выполняется также условие полноты.

Аналогичный смысл для выполнения условий независимости имеет использование количества, формы, размера частиц в качестве диагностических признаков, а также разделение накапливаемых продуктов износа в пространстве или времени в процессе эксплуатации. Последнее в какой-то мере достигается тем, что процессы избыточного износа, как правило, не возникают одновременно.

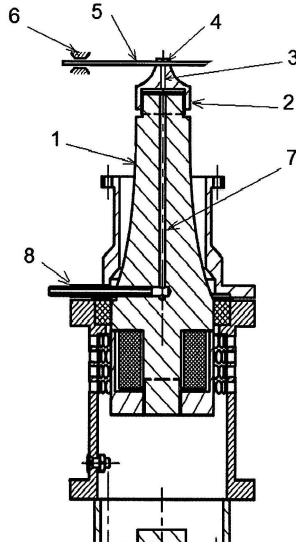
Выполнение этих условий ведет к тому, что понижается ошибка оценок Δ . В идеале, ошибка становится равной нулю, а отображение $x_i^* \rightarrow x_i$ — становится взаимно однозначным.

Чем ниже значения ошибки оценки параметров состояния Δ и погрешность измерения функций состояния Δ^* , тем точнее диагностический метод может оценивать параметры состояния, а следовательно, тем выше достоверность диагностирования.

Глава 2 посвящена разработке и исследованию ультразвукового распылителя проб масел для СВЧ-плазменного спектрометра.

Была разработана и исследована в качестве базовой конструкция распылителя, представленная на рисунке 1. В данной конструкции проба масла распыляется за счет ультразвуковых поперечных колебаний распыляющего капилляра (5) с внутренним и внешним диаметрами 0.75 и 1.05 мм. Распыляющая насадка (2) устанавливается на акустический волновод (1) посредством резьбового соединения. Соединение капилляра и насадки с натягом обеспечивает быструю (5-10 минут) его замену. Капилляр имеет входную и выходную части, разделенные каналом (3). Проба подаётся во входную часть капилляра, преобразуется в аэрозоль и выводится через выходную часть транспортирующим газом (воздухом). Для предотвращения механического разрушения (обрыва) входной части капилляра, её конец зафиксирован скользящим зажимом. На разработанную конструкцию получен патент №128521 (ПМ). Материал насадки и волновода ВТЗ-1, материал капилляра 12Х18Н10Т.

Оптимальный размер входной и выходной части капилляра был определен с учетом известного дифференциального уравнения, описывающего поперечные колебания стержня длиной l , один конец которого свободен, а другой закреплен на опоре, подверженной воздействию гармонической вынуждающей силы:



1 – акустический волновод; 2 – распыляющая насадка; 3 – канал для подачи транспортирующего газа в насадке; 4 – канал для распыляющего капилляра в насадке; 5 – распыляющий капилляр; 6 – скользящий зажим; 7 – канал для подачи транспортирующего газа в волноводе; 8 – штуцер для подачи транспортирующего газа.

Рис. 1 — Ультразвуковой распылитель с поперечными изгибными колебаниями распыляющего капилляра

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = F \cos(\gamma t); \quad a^2 = \frac{EJ}{\rho S} \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала стержня, ρ – плотность материала, S – площадь поперечного сечения стержня, J – момент инерции сечения стержня относительно своей горизонтальной оси.

В результате преобразований получим выражения для соотношения амплитуд на свободном и закреплённом концах стержня:

$$K(l) = \frac{y(l, t)}{y(0, t)} = \frac{Y(l)}{Y(0)} = \frac{ch \, al + \cos \, al}{ch \, al \, \cos \, al + 1} \quad (4)$$

Нули знаменателя этого выражения определяются уравнением:

$$ch \, al \cdot \cos \, al + 1 = 0 \quad (5)$$

Некоторые его решения:

$$al = x_i = 1.875; 4.694; 7.854; 10.9885 \dots \quad (6)$$

Преобразуя выражение для α , получаем условие, при выполнении которого выражение (4) обращается в бесконечность:

$$l = \frac{x_i}{\alpha} = x_i \sqrt{\frac{a}{2\pi\nu}} \quad (7)$$

Решения (6) соответствуют условиям, когда частота вынуждающей силы совпадает с собственными частотами стержня. Соотношение (4) при этом формально обращается в бесконечность — возникает «резонанс». Иными словами, при фиксированной частоте ультразвуковых колебаний можно подобрать длину распыляющего капилляра, когда найдется значительное усиление амплитуды колебаний свободного конца в сравнении с закрепленным (или такую, при которой усиления не будет вовсе). Соответствующие решения можно назвать «гармониками».

На рисунке 2 приведены графики «резонансной» длины для некоторых «гармоник» капилляра, изготовленного из нержавеющей стали.

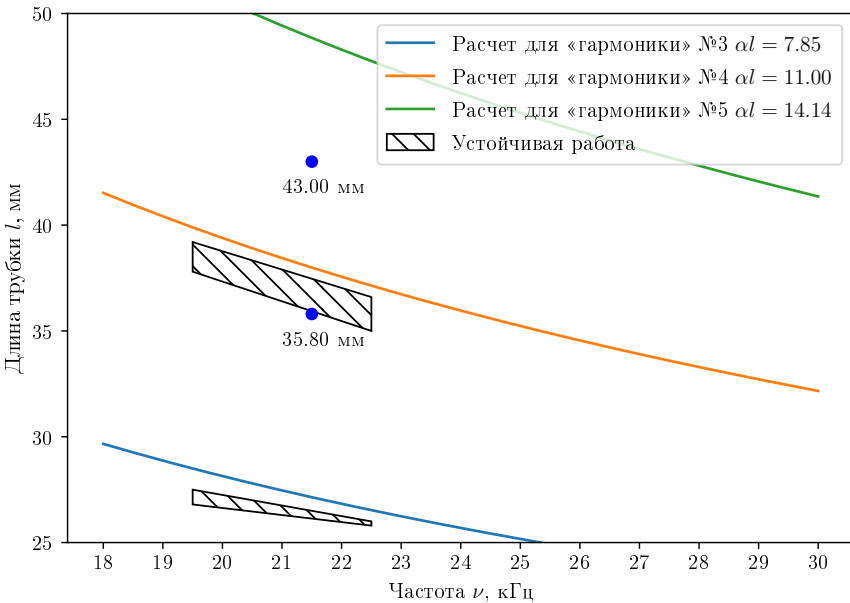


Рис. 2 — Кривые обращения в бесконечность отношения амплитуд и области стабильной работы распылителя

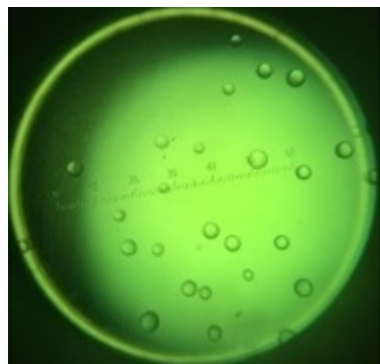
В заштрихованных областях на рисунке 2 наблюдается устойчивое распыление — аэрозоль выходит сплошной струей, не имеющей пульсаций в течении промежутков времени более 10 минут. Диаметр струи аэрозоля

составляет 2 мм на расстоянии 30-40 мм от конца стержня. При приближении по частотам/длинам к «резонансной» кривой наблюдается обрыв распыляющего капилляра (за время от нескольких секунд до 6-10 часов при фиксированных параметрах).

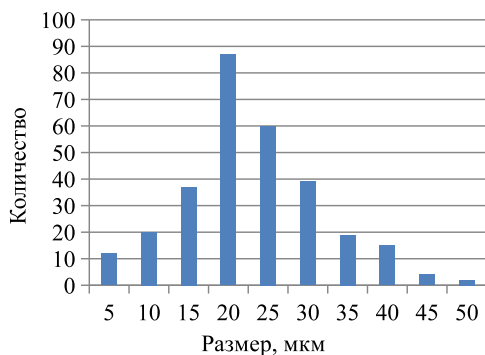
Полученные данные по диапазонам частот, при которых происходит устойчивое распыление, относятся к капиллярам, концы которых имеют срез под углом 30° . В случае, когда капилляр имеет срез, перпендикулярный к его оси, диапазон устойчивого распыления по частотам уменьшается и составляет 0.8 – 1 кГц.

С учетом полученных зависимостей, для входной части капилляра, выступающей из насадки, была подобрана длина в 42 мм. Такая длина позволила проводить эксплуатацию распылителя без обрыва входной части капилляра и без использования скользящего зажима. Для выходной части капилляра была подобрана длина в 35.8 мм. Соответствующие точки отмечены на рисунке 2. Диапазон устойчивого распыления для капилляра этой длины составляет 21–22 кГц.

Размеры капель аэрозоля исследовались двумя способами — методом осаждения (см. рисунок 3) на поверхностно-активное вещество (ПАВ) и методом треков. Исследуемой пробой являлось чистое авиационное масло МС-8П. В обоих случаях проба подавалась при условиях: скорость прокачки 111 мкл/мин, частота ультразвуковых колебаний 22 кГц, расход транспортирующего газа 0.2 л/мин.



а)



б)

Рис. 3 — Измерение диаметров капель масла по осаждению на ПАВ: а) — капли масла МС-8П, б) — гистограмма распределения капель масла по диаметрам

На рисунке 3 представлены осажденные в ПАВ капли масла и гистограмма распределения их по диаметрам. На рисунке 4 представлены

треки капель масла, подсвеченные развернутым в плоскость лазерным лучом и гистограмма распределения треков по ширине.

Максимум распределения для метода осаждением приходится на 20 мкм (см. рис. 3). Для распределения, полученного методом треков, максимум сдвинут влево и составляет порядка 10 мкм (см. рис. 4).

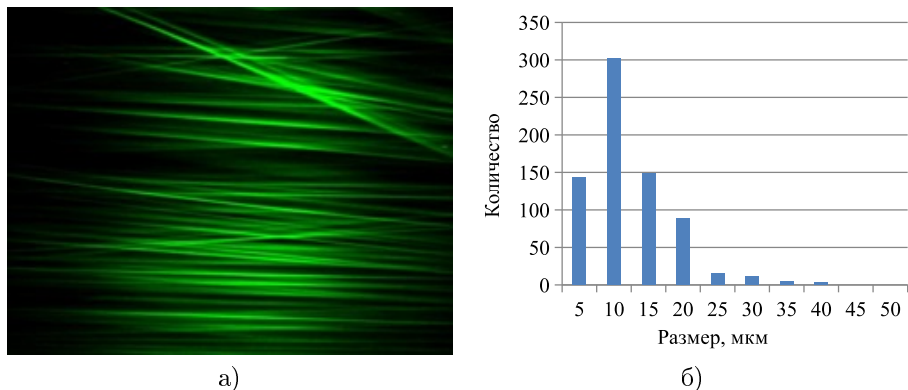


Рис. 4 — Измерение размеров капель масла по трекам: а) — треки капель масла, б) — гистограмма распределения ширины треков

Проверка метода треков на частицах кремния (10-55 мкм в диаметре) показала, что измеренный диаметр частиц увеличивается в ~ 1.5 раза по сравнению с измеренным под микроскопом. В обратную сторону, существует вероятность того, что освещается и оставляет трек лишь центральная часть капли, что уменьшает измеряемый размер капли в ~ 3 раза. Одновременный учет этих эффектов дает максимум распределения по трекам, равный 20-25 мкм.

На способ измерения капель при осаждении в ПАВ получен патент № 2711372. Для автоматического измерения размеров капель в ПАВ по фотоснимкам разработано специальное программное обеспечение, на которое получено свидетельство о регистрации № 2019662642.

Коэффициент вхождения пробы оценивался следующим образом. При вводе пробы в спектрометр, часть капель аэрозоля не входит в плазму, а обтекает плазменное образование и оседает на поверхности плазмообразующей камеры. Далее капли стекают через дренажное отверстие в слив. Сравнение результатов анализа содержимого слива и результатов первичных измерений позволяет оценить коэффициент вхождения пробы как процент импульсов от частиц, попадающих в плазму при первичном измерении относительно совокупного числа импульсов.

Для экспериментальной оценки коэффициента вхождения пробы была приготовлена проба масла с известным составом. В основе такой пробы использовался восьмиэлементный порошковый стандартный

образец (СО) СОЧПИ ГТД УНИИМ (ГСО 10696-2015). В таблице 1 приведены аттестованные для образца массовые доли $C_{\text{общ}}$ по элементам.

Таблица 1 — Результаты измерения коэффициента вхождения пробы

№	Элемент	$C_{\text{общ}}$, %	Длина волны, нм	$N_{\text{исх.}}$, ед	$N_{\text{слив}}$, ед	k , %
1	Al	0.5-3	308.215	124 ± 10	18 ± 4	88
2	Cr	0.3-1.0	357.869	330 ± 36	11 ± 2	97
3	Ni	0.1-0.5	341.476	39 ± 4	4 ± 1	91
4	Mg	1-2	285.213	1214 ± 105	54 ± 12	96
5	Fe	5-7	302.064	940 ± 60	42 ± 9	96
6	Cu	2-4	324.754	2283 ± 169	82 ± 21	97
7	Ag	0.3-0.5	328.068	158 ± 14	5 ± 2	97
8	V	0.01-0.05	318.398	1	0	-

Границы относительной погрешности аттестованных значений по элементам не превышают $\pm 8\%$. По причине малого содержания элемента в образце, ванадий был исключен из рассмотрения.

СО был смешан с маслом МС-8П в пропорции, позволяющей получить при измерениях 10-16 импульсных сигналов от металлических частиц в секунду суммарно по элементам. Этот показатель является собой оптимум между максимальной частотой импульсов и минимальной вероятностью наложения их друг на друга, используемый при стандартной эксплуатации СВЧ-плазменного спектрометра.

Измерялся объём распылённого масла, объём полученного слива, количество импульсов, зарегистрированных при первичном анализе пробы проб и анализе всего объёма слива.

Коэффициент вхождения пробы оценивался как отношение количества импульсов, зарегистрированных в первичном измерении к общему количеству импульсов в пробах стандартного образца:

$$k = \frac{N_{\text{исх.}}}{N_{\text{исх.}} + N_{\text{слив}}} \quad (8)$$

где k — коэффициент вхождения пробы, $N_{\text{слив}}$ — количество импульсов, зарегистрированное в «пробе слива», $N_{\text{исх.}}$ — количество импульсов, зарегистрированных в первичных пробах СО СОЧПИ. Результаты измерений приведены в таблице 1. В той же таблице указаны длины волн аналитических линий спектрометра.

Общий объём первичных проб составил 28 мл. Аналитическая навеска в каждом проведенном измерении — 1 мл. Объём слива (7.5 мл) составил 26.8% от объёма первичных проб, а доля импульсов от металлических частиц, попавших в слив, относительно общего их числа в пробах, изменялась в пределах от 3 до 12% для различных элементов. Среднее по элементам значение коэффициента вхождения составило 94%,

что соответствует поставленным требованиям к качественному вводу пробы.

Для оценки влияния накопления материала пробы предыдущего измерения на следующее (гистерезиса), измерялась доля остаточного числа частиц $k_{\text{ост.}}$. Остаточное число частиц $N_{\text{ост.}}$ измерялось как число частиц в пробе «чистого» масла МС-8П. Перед этим производилось трехкратное измерение числа частиц $N_{\text{исх.}}$ в пробе СО СОЧПИ. Измерения остаточного числа частиц повторялись трижды. Доля остаточного числа частиц оценивалась как:

$$k_{\text{ост.}} = \frac{N_{\text{ост.}}}{N_{\text{исх.}} + N_{\text{ост.}}} \quad (9)$$

Доля остаточного числа частиц в среднем по элементам составила 1.7% и не превышала 2.3%, что соответствует поставленным требованиям к качественному вводу пробы.

Глава 3 посвящена разработке способа выделения и обработки аналитического сигнала от элемента, находящегося в пробе как в форме частиц износа более 2 мкм, так и в форме растворённой примеси.

В разработанном подходе СВЧ-плазменный сигнал рассматривается как сумма двух случайных сигналов:

1. Непрерывного сигнала, характеризуемого малыми шумовыми амплитудами, медленным и плавным изменением среднего значения со временем. Этот сигнал несёт информацию об элементе в форме растворённой примеси;
2. Импульсного сигнала, формируемого отдельными не перекрывающимися импульсами с амплитудой больше амплитуды непрерывного сигнала. Этот сигнал несёт информацию об элементе в форме частиц размером более 2 мкм.

В качестве иллюстрации на рис. 5 приведены импульсные сигналы, налагающиеся на непрерывный, медленно меняющийся сигнал (а).

Наиболее просто осуществить разделение сигналов программным способом. Блок-схема соответствующего алгоритма приведена на рисунке 6.

Алгоритм принимает на вход оцифрованный отсчет сигнала одного из фотоумножителей. Значения отсчетов предварительно сглаживаются скользящим средним размером 500 мкс. Сигнал обрабатывается в одном из двух режимов R – режим «фон» или режим «импульс». По-умолчанию регистрация сигнала начинается в режиме «фон». В ходе работы вычисляется и выводится значение импульсного сигнала P , непрерывного сигнала B , и новый режим работы R . В режиме «фон» импульсный сигнал P всегда равен нулю, а непрерывный сигнал B равен исходному. Переход в режим «импульс» выполняется при условии, что увеличение сигнала относительно предыдущего значения

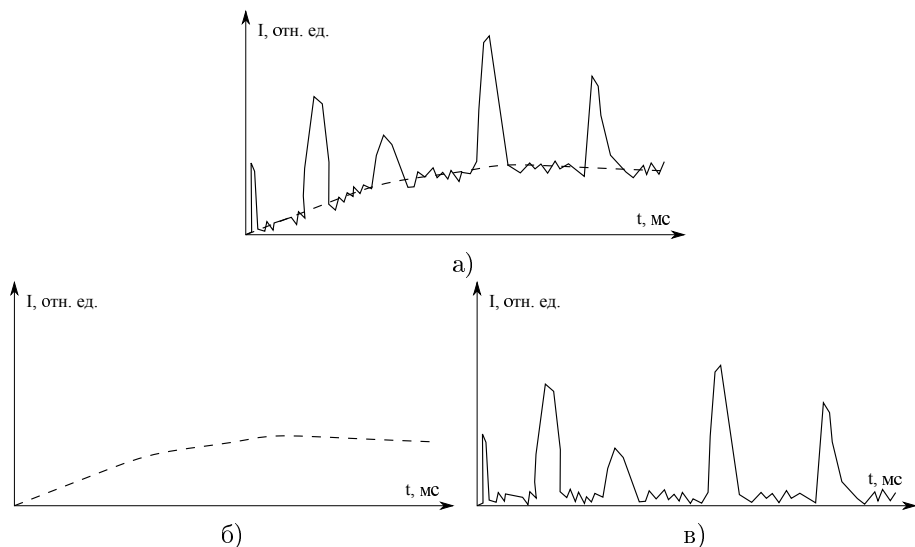


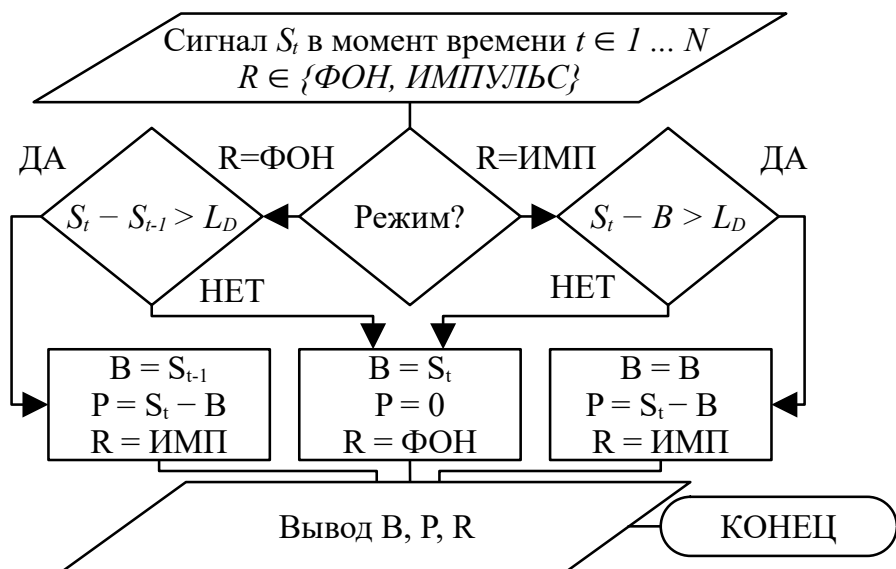
Рис. 5 — Иллюстрация налагающихся непрерывного и импульсного сигналов

превышает заранее заданную величину L_D — «уровень дискриминации». Значение непрерывного сигнала B в режиме «импульс» замораживается, а значение импульсного равно разнице между исходным сигналом и непрерывным. При падении значения импульсного сигнала ниже нуля, режим «фон» восстанавливается. Алгоритм затем выполняется для следующего измеренного отсчета, и так до конца измерения.

В результате работы алгоритма для выделенных сигналов получается картина, представленная ранее на рисунке 5 (б, в).

Уровень дискриминации L_D настраивается таким образом, чтобы от пробы, не содержащей дискретной примеси (частиц размером более 2 мкм), не регистрировалось ни одного импульса. В качестве такой пробы могут использоваться образцы, где элемент введён в пробу масла в виде растворённого металлоорганического комплекса (образец типа Conostan).

При таком подходе имеется возможность задавать максимальную длительность импульса. Длительности импульсов зависят от распределения температур источника возбуждения спектров и длительности нахождения примеси в аналитической (высокотемпературной) зоне и могут составлять от сотен мкс до единиц мс. Работа алгоритма в режиме «импульс» более 10 мс сигнализирует о том, что регистрируется не импульсный сигнал, а по каким-то причинам скачкообразно повышенный непрерывный сигнал. Например по причине флуктуации сигнала в результате неравномерной работы распылителя.



Обозначения: R – режим работы, S_t – уровень сигнала в моменты времени t_n , B – непрерывный сигнал, P – импульсный сигнал, L_D – «уровень дискриминации»

Рис. 6 — Блок-схема алгоритма отдельного выделения сигналов

Такие ситуации можно выявить посредством дискриминации импульсов по длительности.

В качестве аналитических параметров выбираются сумма импульсного сигнала и сумма непрерывного сигнала за экспозицию. Соответствующие им массовые доли элемента в форме твердых частиц размером более 2 мкм, и элемента в форме растворённой примеси могут быть найдены после определения соответствующих коэффициентов пропорциональности при анализе стандартных образцов.

Корректность описанного выше подхода оценивалась с помощью сравнительных измерений. В качестве контрольного метода использовалось разложение 0.1 г сухого порошка пробы в смеси кислот 2 мл HCl и 1 мл HNO₃ с атомно-абсорбционным (АА) окончанием на спектрометре VARIAN AA240FS (институт ТОМС, г. Иркутск). Результаты измерений приведены в таблице 2.

В таблице как C_U и C_D обозначены массовая доля примеси в форме частиц более 2 мкм и в растворённой форме, соответственно.

В первом случае (№1) измерялось содержание примеси в пробе масла с двигателя, в котором повреждение развивалось с выделением, в основном, продуктов износа в форме частиц диаметром менее 2 мкм.

Таблица 2 — Результаты измерений массовой доли $C_{\text{общ}}$ для Fe и Cu в пробах двигателей СВЧ-плазменным и атомно-абсорбционным (АА) методами

№	Элемент	СВЧ-плазменный метод	АА метод
		$C_U + C_D = C_{\text{общ.}}, \text{ г/т}$	$C_{\text{общ.}}, \text{ г/т}$
1	Fe	$2.15 + 0.80 = 2.95 \pm 1.04$	3.05 ± 0.31
	Cu	$0.041 + 0.012 = 0.05 \pm 0.04$	0.06 ± 0.02
2	Fe	$2.25 + 3.00 = 5.25 \pm 1.79$	6.07 ± 0.61
	Cu	$1.37 + 1.12 = 2.49 \pm 0.89$	2.25 ± 0.21

Во втором случае (№ 2) произведено измерение пробы смыва с маслофильтра с исправного двигателя.

Согласно таблице 2 можно заметить, что результаты измерений $C_{\text{общ}}$ атомно-абсорбционным методом и СВЧ-плазменным методами совпадают в пределах погрешности. Как для случая № 1, так и для случая № 2.

Разработанное программное обеспечение для выделения сигналов стало частью программного комплекса управления спектрометром «Регистрация». СВЧ-плазменный анализатор зарегистрирован в госреестре СИ под номером № 64278-16. Методика измерений массовой доли в форме растворённой примеси аттестована для магния, железа, меди.

В главе 4 исследуется возможность автоматизации принятия диагностического решения по результатам СВЧ-плазменных измерений.

В работе был проведен анализ параметров примеси в пробах смывов, измеренных с помощью СВЧ-плазменного метода с использованием статистических методов и методов машинного обучения с целью создания системы, позволяющей автоматически определять техническое состояние двигателя.

В исходную выборку вошли данные с двигателей Д30-КП/КП-2, имевшие наработку более 500 часов после ремонта за 2010-2018 гг. Распределение проб по техническому состоянию двигателей приведено в таблице 3.

Таблица 3 — Распределение проб по техническому состоянию двигателей

№	Состояние двигателя	Кол-во проб
1	в норме	532
2	особый контроль	292
3	повреждение р/п ТВД	30
4	повреждение узлов ПКП	33
5	повреждение узлов ЗКП	3
6	повреждение МВП	2
7	повреждение р/п КВД	1
8	повреждение ш/п КВД	1

Таким образом, в выборке присутствует информация о пробах двигателей с повреждением передней и задней коробок приводов (ПКП, ЗКП); внутренних и наружных колец и сепаратора роликоподшипника (р/п) турбины высокого давления; межвального роликоподшипника (МВП); шарикоподшипников (ш/п) компрессора высокого давления (КВД).

Очевидно, что создание статистической модели неисправного двигателя процесс чрезвычайно длительный. Поэтому основной диагностический подход здесь заключается в поиске отличий конкретной пробы от модели исправного двигателя, указывающих на наличие неисправности.

В случае, когда такие отличия есть (граничные значения параметров превышены), для пробы двигателя указывается состояние «особый контроль». Однако, сами граничные значения и перечень параметров, подверженных действию этого критерия, недостаточно сформулированы. Выбросом может считаться граница как в два так и в три стандартных отклонения выше среднего значения. Набор параметров же определяется экспертом от пробы к пробе в индивидуальном порядке.

В случае, когда значения параметров оказываются сходными по составу с материалами определённого узла трения двигателя, делается заключение о наличии в нем повреждения. При этом, легирующие элементы входящие в состав материала могут практически отсутствовать в измерении (например, в случае развития повреждения с генерацией частиц мелкодисперсной фракции – до 5–10 мкм), не говоря уже о точном соответствии пропорций между элементами. Тем не менее, чаще всего локализация поврежденного узла при этом оказывается корректной. Корректность сформулированных экспертом диагностических рекомендаций подтверждается заводскими исследованиями соответствующего двигателя.

Задача автоматизации принятия диагностического решения выполнялась путем построения классификатора на основе «случайного леса», алгоритма машинного обучения. В качестве классов были выбраны состояния «в норме», «особый контроль», «поврежден».

Основную информацию о процессах износа в двигателе несет проба смыва с маслофильтра (фильтроэлемента). Для принятия диагностического решения исследователями были сформулированы следующие дополнительные признаки:

1. $[V^{(i)}]$, ед — отношение количества «сложных» частиц (из нескольких элементов) к «простым» (из элемента i); например $V^{(Fe)}$ — «коэффициент износа по Fe»;
2. $[R_{общ}^{(i)}]$, % — вклад общего количества частиц износа с включением определённого элемента i , в общее количество частиц износа, «рейтинг частиц износа для элемента i »;

3. $[R_{\text{пр.}}^{(i)}]$, $\%_0$ — вклад количества «простых» частиц износа определённого элемента в общее количество частиц износа «рейтинг простых частиц износа для элемента i »;
4. $[R_{\text{сл.}}^{(j)}]$, $\%_0$ — вклад количества «сложных» частиц износа определённого состава j в общее количество частиц износа; например, $R_{\text{сл.}}^{(\text{Cu-Ag})}$ - «рейтинг сложных частиц Cu-Ag».

Здесь $i \in I, j \in J. I := \{Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V\}$. J представляет собой подмножества (сочетания) по k элементов из $I, k \in \{1, 2, 3\}$. Сочетания $k > 3$ отброшены в силу вероятности появления менее 5%.

Рейтинг частиц износа рассчитывается, как количество частиц определённого сорта, приходящихся на 1000 частиц износа всех сортов. Считается, что такой нормировкой устраняется влияние времени накопления частиц на фильтре, степени разбавления пробы и т. д.

На основе указанных выше признаков были сконструированы новые. Признак $R_{\text{сл.}}^{(i)} := R_{\text{общ.}}^{(i)} - R_{\text{пр.}}^{(i)}$ — количество сложных частиц с включением элемента i ; также признак O , представляющий собой число статистических выбросов для признаков в следующих группах (1, 2):

1. «Одноэлементные» параметры — $R_{\text{сл.}}^{(i)}, R_{\text{общ.}}^{(i)}, V^{(i)}, \bar{d}^{(i)}$ - средний диаметр частиц, $C_U^{(i)}$ массовая доля элемента в растворённой форме, $C_D^{(i)}$ массовая доля элемента в крупных частицах;
2. «Многоэлементные» параметры — рейтинги частиц из нескольких элементов $R_{\text{сл.}}^{(j)}$.

«Выбросом» считалось превышение значения сверх границы 95-перцентиля, рассчитанного по выборке исправных двигателей с наработкой более 500 часов. Количество «выбросов» отдельно в группах 1, 2 выступило в качестве двух новых признаков - $O_{95}^{(1)}, O_{95}^{(2)}$. Аналогично, были введены такие же признаки, но с использованием в качестве границы выброса 99-перцентиля параметра — $O_{99}^{(1)}, O_{99}^{(2)}$.

Пробы класса «особый контроль», для которых $O_{95}^{(1)} = 0$ или $O_{95}^{(2)} = 0$ (20 проб), были переведены в класс «в норме».

Нормированная матрица ошибок («confusion matrix») классификатора, построенного на основе 12 сконструированных признаков ($O, R_{\text{сл.}}^{(i)}$) показана в табл. 4:

Таблица 4 — Нормированная матрица ошибок классификатора

Эксперт \ Модель	k_1	k_2	k_3	Всего проб
d_1	(68±7)%	(28±7)%	(4±2)%	266
d_2	(25±8)%	(64±9)%	(11±6)%	146
d_3	(5±6)%	(31±16)%	(64±17)%	39

Здесь d_m — оценка состояния экспертом; k_n — диагноз модели; $m, n \in \{ \text{«в норме»}, \text{«особый контроль»}, \text{«поврежден»} \}$. Каждая строка нормирована на число проб класса m (столбец всего проб), т.е. для строки $k_1 + k_2 + k_3 = 100\%$, т.е. в ячейках указана условная вероятность $P(k_n | d_m)$. На главной диагонали $m = n$ указан процент корректных диагнозов модели, в остальных ячейках - ошибочных.

Результат классификации технического состояния узлов трения маслосистемы двигателей Д30КП/КП-2, по классам «норма», «особый контроль», «поврежден», совпадает с результатом экспертной оценки в 68%, 64% и 64% случаев соответственно. В 5% случаев повреждение не обнаруживается алгоритмом при таком уровне износа, когда поврежденный узел может быть локализован экспертом. В 4% случаев пробы класса «норма» определяются как поврежденные. Некорректная классификация в этих случаях может быть объяснена корректировкой статистической модели с течением времени без повторного проведения экспертной оценки. В пользу этого свидетельствует то, что в статистике присутствуют пробы классов «особый контроль», «поврежден» без превышения границы 95-перцентиля (более 20 проб). Тем же образом может быть объяснена невысокая точность определения класса «особый контроль» (64%).

Так как процент некорректной классификации для указанных случаев сравнительно невелик (4% и 5%), разработанный алгоритм можно использовать в качестве оценочного способа автоматизированного определения технического состояния узлов трения маслосистемы двигателей Д30КП/КП-2. Приоритетными способами улучшения результата классификации могут являться снижение погрешности определения количества частиц сложных составов СВЧ-плазменным методом, а также ревизия экспертной оценки с последующим переобучением алгоритма.

Основные результаты и выводы

1. Проведен анализ используемых на практике лабораторных методов эксплуатационного контроля омываемых смазочных маслом узлов трения авиационных газотурбинных двигателей. Выявлена их низкая (5-7%) достоверность и исследованы её причины. Причинами являются, в частности, небольшое (1-2) число параметров, используемых при принятии диагностического решения, неучет параметров частиц износа, накапливаемых на основном маслофильтре.

2. Поскольку атомно-эмиссионным СВЧ-плазменным методом определяется массовая доля элемента, число частиц с включением элемента, средний размер частиц с включением элемента и другие параметры металлической примеси в пробе для 16 элементов

одновременно, он является перспективным методом, обеспечивающим принятие достоверного диагностического решения;

3. Погрешность определения параметров продуктов износа СВЧ-плазменным методом, в высокой степени определяется распылителем в составе подачи пробы спектрометра. Сформулированы требования для качественного ввода пробы, соблюдение которых позволяет снизить влияние способа ввода пробы на сигнал СВЧ-плазменного спектрометра путем уменьшения влияния температурных градиентов плазмы, неравномерностей при подаче пробы и обеспечения возможности соблюдения принципа сцинтилляции;

4. Проведённые испытания показали, что существующие промышленные распылители вязких жидкостей не удовлетворяют поставленной совокупности требований. Поэтому возникает необходимость в разработке оригинальной конструкции распылителя;

5. Предложена конструкция ультразвукового распылителя на основе поперечных колебаний распыляющего капилляра для ввода пробы в горелку СВЧ-плазменного спектрометра, не имеющая распылительной камеры и позволяющая произвести замену распыляющей насадки или распыляющего капилляра за 5-10 минут;

6. Предложена математическая модель капилляра для разработанной конструкции распылителя. Капилляр смоделирован в виде стержня, закрепленного на опоре, подверженной действию гармонической вынуждающей силы. Получена зависимость соотношения колебаний свободного конца и опоры от частоты колебаний опоры и параметров капилляра;

7. Предложен способ и программное обеспечение для автоматизированного измерения размера капель получаемого распылителем аэрозоля. Капли осаждаются в поверхностно-активное вещество и фотографируются. Диаметр капель определяется посредством обработки фотоснимков. Диапазон измерений составляет от 5 до 100 мкм. Способ отличается от существующих способов получением капель в виде ровных сфероидов, простотой применения и отсутствием необходимости в дорогостоящем оборудовании;

8. Проведены исследования параметров предложенной конструкции ультразвукового распылителя:

- измеренный диаметр струи аэрозоля составил 2 мм на расстоянии 34.5 мм от конца распыляющего капилляра;
- струя аэрозоля не имеет разрывов и пульсаций в течении промежутков времени более 10 минут;
- скорость подачи пробы составляет 111 мкл/мин (для подачи аналитической навески 1 мл за 9 минут, может регулироваться в диапазоне 40-500 мкл/мин);
- максимум распределения капель по размерам составляет 20 мкм;

- коэффициент вхождения пробы составил более 90%;
- расход транспортирующего газа 0.2 ± 0.02 л/мин;
- доля остаточного числа частиц совокупно по элементам составила 1.7% и не более 5%.

Показано, что конструкция удовлетворяет требованиям для качественного ввода пробы;

9. Разработан алгоритм и программная реализация отдельной регистрации непрерывного и импульсного сигналов при СВЧ-плазменных измерениях.

Использование предложенного алгоритма отдельного выделения непрерывного и импульсного сигналов позволяет перевести СВЧ-плазменный метод в количественную категорию анализа. Для СВЧ-плазменного спектрометра с использованием предложенного алгоритма регистрации сигналов, аттестована методика (№ 64278-16) измерения массовой доли элемента (в форме частиц размером более 2 мкм) в диапазонах:

- медь $0.35-2.1 \pm (0.22 + 0.22 \cdot C_x)$ млн⁻¹;
- железо $0.5-6.9 \pm (0.36 + 0.33 \cdot C_x)$ млн⁻¹;
- магний $0.6-1.2 \pm (0.33 + 0.34 \cdot C_x)$ млн⁻¹.

Массовой доли элемента в форме растворённой примеси:

- медь $0.2-3.0 \pm 0.2$ млн⁻¹;
- железо и магний $0.3-3.0 \pm 0.3$ млн⁻¹.

Для серебра, никеля и хрома аттестована методика измерения общей массовой доли элемента.

Измерение содержания элемента в форме растворённой примеси позволяет определить наличие повреждения узлов трения двигателя в случаях, когда повреждение сопровождается выделением в масло повышенного количества частиц износа размером менее 2 мкм. Возможность учета этих случаев повышает достоверность диагностирования;

10. Предложен классификатор состояния узлов трения маслосистемы двигателей ДЗОКП/КП-2, построенный на основе алгоритма «случайного леса». В качестве классов используются состояния «в норме», «особый контроль», «поврежден». В качестве параметров алгоритм принимает определенные для одной пробы массовую долю элемента в форме растворённой примеси, массовую долю элемента в форме частиц размером более 2 мкм, рейтинги сложных частиц износа по элементу, рейтинги общего количества частиц по элементу, «коэффициенты износа» по элементу и производные параметры. В 68%, 64% и 64% случаев результаты классификации совпадают с экспертным методом для классов «в норме», «особый контроль», «поврежден», соответственно. Классификатор позволяет проводить диагностику в случаях, когда нет возможности воспользоваться экспертным методом.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю Иванову Н. А. за определяющее участие в подготовке диссертации; Дрокову В. Г. за предоставление оборудования, руководство и обсуждение исследований; Калошину А. Е. за разработку чернового варианта математической модели капилляра; Васильевой И. Е., Казмирову А. Д., Скудаеву Ю. Д., Павлинскому Г. В., Афанасьеву А. Д., Дрокову В. Вл. и Мурыщенко В. В. за ценные замечания к работе; Давыдовой И. В., Самборскому А. В. и Самолиге В. С. за неоценимую ежедневную поддержку.

Публикации автора по теме диссертации

Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (4):

1. Ходунаев А. Ю. Использование способов машинного обучения при оценке технического состояния узлов маслосистемы газотурбинных двигателей при СВЧ плазменных измерениях / Дроков В. Г., Дроков В. В., Мурыщенко В. В., Ходунаев А. Ю. // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2019. – № 27. – С. 120–130. (лично автором — 1 п.л.)
2. Ходунаев А. Ю. Моделирование процессов фильтрации металлической дискретной примеси в маслосистеме ГТД методом Монте-Карло / Дроков В. Г., Дроков В. В., Мурыщенко В. В., Ходунаев А. Ю. // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2019. – № 27. – С. 96–108. (лично автором — 0.2 п.л.)
3. Ходунаев А. Ю. Формирование и выделение аналитического сигнала при исследовании авиационных масел атомно-эмиссионным сцинтилляционным методом / Дроков В. Г., Дроков В. В., Казмиров А. Д., Сеницкая А. В., Ходунаев А. Ю. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 6. – С. 39–43. (лично автором — 0.3 п.л.)
4. Ходунаев А. Ю. Исследование частиц изнашивания в пробах масел авиационных газотурбинных двигателей рентгенофлуоресцентным анализатором "ФОКУС-2" / Дроков В. Г., Павлинский Г. В., Сеницкая А. В., Ходунаев А. Ю. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 7. – С. 32–36. (лично автором — 0.3 п.л.)

**В изданиях, входящих в международную базу
цитирования «Scopus» (6):**

5. Hodunaev A. Y. Development of microwave plasma method for measurement of wear particle parameters in lubricant oil samples from aircraft gas turbine engines / Drokov V. G., Drokov V. V., Ivanov N. A., Myrishenko V. V., Skudaev Y. D., Hodunaev A. Y. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012059. (лично автором — 0.3 п.л.)
6. Hodunaev A. Y. Ultrasonic sprayer of liquid samples for atomic-emission microwave plasma analyzer / Drokov V. G., Drokov V. V., Kaloshin A. E., Myrishenko V. V., Skudaev Y. D., Hodunaev A. Y. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012060. (лично автором — 0.4 п.л.)
7. Hodunaev A. Y. Technical state evaluation of oil-lubricated parts and units of aircraft gas turbine engines using microwave plasma method / Drokov V. G., Drokov V. V., Ivanov N. A., Myrishenko V. V., Skudaev Y. D., Hodunaev A. Y. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012058. (лично автором — 0.3 п.л.)
8. Hodunaev A. Y. Automated defect detection in oil-lubricated parts and units of D30KP/KP-2 aircraft gas turbine engines by results of microwave plasma method / Drokov V. G., Drokov V. V., Myrishenko V. V., Hodunaev A. Y. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1384. — P. 012017. (лично автором — 0.4 п.л.)
9. Hodunaev A. Y. Wear evaluation methods for friction units of aircraft GTE oil systems: The lab-based methods / Hodunaev A. Y. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol 860. – P. 012037. (лично автором — 0.75 п.л.)
10. Hodunaev A. Y. Wear evaluation methods for friction units of aircraft GTE oil systems: The on-line methods / Hodunaev A. Y. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol 860. – P. 012036. (лично автором — 0.75 п.л.)

Публикации в трудах международных конференций (3):

11. Ходунаев А. Ю. Применение алгоритма случайного леса для автоматизированной поузловой оценки технического состояния узлов маслосистемы авиационных двигателей Д30/КП/КУ/КУ-154 / Ходунаев А. Ю., Иванов Н. А. // X Международная конференция «Авиационное машиностроение и транспорт Сибири»: мат. X. международ. конф. – 2018. – С. 115–122. (лично автором — 0.4 п.л.)
12. Ходунаев А. Ю. Автоматизированное определение наличия неисправности в узлах трения маслосистемы авиационных двигателей Д30КП по результатам СВЧ-плазменных измерений /

- Ходунаев А. Ю. // XII Международная конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» : мат. XII. междунаро. конф. – 2019. – С. 115–120. (лично автором — 0.625 п. л.)
13. Ходунаев А. Ю. Разработка блока подачи пробы масла и системы его управления для сцинтилляционного спектрометра / Ходунаев А. Ю. Яковлев В. // Международная молодежная научная конференция «XXI ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ (школа молодых ученых)» : мат. междунаро. молодежн. научн. конф. – 2013. – С. 310–312. (лично автором — 0.2 п. л.)

В прочих изданиях (6):

14. Патент № 128521 Российская Федерация. Ультразвуковой распылитель : № 2012154502/058 : заявл. 14.12.2012 : опубл. 27.05.2013. / Ходунаев А. Ю., Дроков В. Г., Скудаев Ю. Д.
15. Патент № 167838 Российская Федерация. Устройство позиционирования распыляющей системы : № 2016127165 : заявл. 05.07.2016 : опубл. 01.01.2017. / Ходунаев А. Ю. [и др.].
16. Патент № 185308 Российская Федерация. Устройство позиционирования распыляющей системы : № 2018120973 : заявл. 06.06.2012 : опубл. 01.01.2018. / Ходунаев А. Ю. [и др.].
17. Патент № 2711372 Российская Федерация. Способ измерения размера капель масла : № 2018143519 : заявл. 10.12.2018 : опубл. 10.12.2020. / Ходунаев А. Ю., Мурыщенко В. В., Скудаев Ю. Д., Дроков В. В.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616927 Российская Федерация. Анализ частиц. : № 2015613562 : заявл. 29.04.2015 : опубл. 20.07.2015 / Ходунаев А. Ю.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662642 Российская Федерация. Программа для измерения капель 1.0.0. : № 2019661120 : заявл. 12.09.2019. : опубл. 27.09.2019 / Ходунаев А. Ю., Мурыщенко В. В.