

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Иркутский Национальный Исследовательский
Технический Университет» (ИРНИТУ)

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»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук,
Иванов Николай Аркадьевич

Иркутск — 2023

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Трибодиагностические методы измерения параметров частиц износа для оценки технического состояния узлов и деталей, омываемых смазочным маслом ГТД .	15
1.1 Встраиваемая аппаратура для контроля технического состояния узлов трения маслосистемы ГТД	15
1.2 Наземная (лабораторная) аппаратура для контроля технического состояния узлов трения маслосистемы ГТД	21
1.3 Атомно-эмиссионный СВЧ-плазменный метод элементного анализа	28
1.4 Математическая постановка задач диссертации	37
1.5 Выводы по главе	39
Глава 2. Разработка ультразвукового распылителя жидких проб для СВЧ-плазменного спектрометра	42
2.1 Разработка конструкции ультразвукового распылителя и оптимизация её параметров	47
2.2 Измерение диаметра получаемых распылителем капель	54
2.3 Измерение гистерезиса измеряемых параметров и коэффициента вхождения пробы при эксплуатации распылителя	60
2.4 Выводы по главе	62
Глава 3. Способ формирования и выделения сигнала при СВЧ-плазменных измерениях	64
3.1 Формирование аналитического сигнала для непрерывно распределенной примеси	66

3.2	Формирование аналитического сигнала для примеси в форме частиц	67
3.3	Способ отдельного выделения непрерывного и импульсного сигналов при СВЧ-плазменных измерениях	69
3.4	Экспериментальное подтверждение разработанного способа выделения сигнала	73
3.5	Выводы по главе	74
Глава 4. Автоматизация принятия диагностического решения по результатам СВЧ-плазменных измерений		
4.1	Методы машинного обучения	78
4.2	Построение базового классификатора состояний	79
4.3	Совершенствование классификатора состояний	83
4.4	Выводы по главе	88
Основные результаты и выводы		89
Список литературы		93
Приложение А.		107

Введение

Актуальность темы. Согласно статистике ГосЦентра безопасности полетов воздушных судов, до 40% инцидентов в воздухе связаны с двигателями [1]. 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 [2]. 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 [3]. 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

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

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. Основоположителем сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектроскопии считается²Б. 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 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.

²Карпов, Ю. А. Аналитический контроль благородных металлов / Карпов, Ю. А [и др.] — Техносфера, 2019. — С. 82

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 методическое 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 корректным 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 назначений». Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57718X0289.

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

Глава 1. Трибодиагностические методы измерения параметров частиц износа для оценки технического состояния узлов и деталей, омываемых смазочным маслом ГТД

1.1 Встраиваемая аппаратура для контроля технического состояния узлов трения маслосистемы ГТД

Частицы, образующиеся и поступающие в смазочное масло в результате взаимодействия пар трения, являются индикаторами процессов износа, происходящих в узлах и агрегатах газотурбинного двигателя. В двигателестроении широко распространены бортовые устройства контроля технического состояния путем обнаружения частиц износа на контрольных элементах, к которым относятся — фильтры-сигнализаторы, магнитные стружко-сигнализаторы и магнитные пробки, предназначенные для фиксации повреждения и предотвращения разрушения двигателя.

В последние десятилетия активно развивается интерес эксплуатантов авиационной техники к созданию бортовых систем онлайн диагностики, способных не только зафиксировать повреждение, но и спрогнозировать остаточный ресурс двигателя. По сравнению с традиционными наземными методами диагностики, использование бортовых средств контроля потенциально может обладать рядом преимуществ:

1. При установке в маслосистеме нескольких средств контроля может быть осуществлена взаимная корректировка их показаний относительно друг друга, что позволит проводить селективную регистрацию параметров частиц износа от отдельной функциональной системы двигателя;
2. Для осуществления контроля не требуется отбор проб и не затрачивается время на их анализ. При высокой достоверности

диагностирования возможен переход на техническое обслуживание «по состоянию».

Из литературы известно, что в маслосистеме авиационных газотурбинных двигателей скорость потока масла составляет порядка 40–60 л/мин, диаметр потока — 20–25 мм, а максимум распределения частиц износа по размерам находится в области 15–25 мкм. Кратко рассмотрим принцип действия и возможности некоторых видов проточных датчиков, имея ввиду эти условия.

1. В оптических датчиках [4–11], поток частиц подсвечивается и регистрируется фотоэлементом (либо фотоматрицей). Контролируется изменение интенсивности света относительно опорного значения. Ослабление света в контролируемой области указывает на присутствие там частицы, либо могут быть непосредственно получены изображения частиц.

При малых поперечных размерах (1.2 x 1.6 мм) и скоростях (1 л/мин) потока жидкости могут быть обнаружены частицы размером от 5 мкм, произведен их счет и оценены размеры.

Показания датчиков этого типа подвержены влиянию чистоты и скорости потока масла, избыточному количеству частиц, наличию в масле посторонних элементов (пузырьки воды, воздуха) и обладают ограниченной производительностью (1 л/мин) что делает затруднительным их использование для диагностики маслосистемы ГТД [2].

2. Общая схема ультразвуковых датчиков [12–17] аналогична оптическим, с той разницей, что используется акустический источник и детектор волны вместо светового. Может быть определен размер и количество частиц [12]. В гидравлической или смазочной системах могут быть обнаружены частицы размером от 30 мкм до 1000 мкм [18]. Пузырьки воды, воздуха и металлические частицы могут быть обнаружены отдельно [14]. Датчик в работе [12] позволяет определить металлические частицы размером от 75 мкм в условиях, когда скорость потока смазочного масла составляет $0.4 \cdot 10^{-3}$ л/мин, а диаметр — 6.5 мм. При этом возможно отличить неметаллические, металлические ферромагнитные и металлические неферромагнитные частицы.

Метод малоприменим для диагностики маслосистемы ГТД в качестве встраиваемого устройства, поскольку чувствительность метода зависит от вязкости масла, скорости потока и возможна регистрация механических вибраций, а также ограничена производительность метода [2].

3. Частицы износа накапливают заряд при трении. На этом явлении основан датчик статического электричества, представляющий собой проводник, помещённый в контрольную среду.

Изначально датчики такого типа были разработаны для контроля газовых путей двигателей [19–21]. В дальнейшем, была показана возможность их применения в маслосистеме в испытаниях на лабораторных стендах шестерён и подшипников [22–27], в том числе роликоподшипника реактивного двигателя F100 [28–30].

Одной из особенностей этого типа датчиков является регистрация неметаллических частиц, что важно при эксплуатации пластиковых и керамических подшипников, однако материал при этом определить нельзя. Датчик позволяет оценивать количество частиц размером от 20–50 мкм в потоке от 7 до 9 л/мин при стендовых испытаниях [26]. При стендовых испытаниях электростатическим способом удалось обнаружить повреждение роликоподшипника за 18 часов до полного отказа [31], в условиях перегрузки (200% от номинальной динамической нагрузки) и при скорости потока 4 л/мин. На данный момент, разработка не получила промышленного применения в связи со сложностью идентификации источников и механизмов заряда в сложной трибологической системе [32].

4. Ёмкостный датчик (счётчик Коултера) состоит из двух резервуаров, соединённых каналом. Присутствие частицы в канале изменяет сопротивление жидкости. Так как масло имеет низкую проводимость, это изменение сложно измерить. Вместо этого может контролироваться изменение ёмкости между парой электродов в канале, что позволяет обнаруживать частицы размером 10-25 мкм в каналах микронных размеров [33]. Однако, при этом фактически требуется поступление частиц по одной и заземление каждого канала клеткой

Фарадея, что ограничивает возможности датчика в применениях, где требуется высокая производительность (от 1 л/мин).

5. Наибольшее применение в авиационной технике получили вихрековые датчики. Их действие основано на возмущении электромагнитного тока частицей, проходящей в потоке жидкости.

Канадской компанией GasTOPS разработан датчик MetalSCAN, с использованием трёх катушек индуктивности, расположенных последовательно вдоль потока частиц [34]. Крайние катушки подключены к источнику переменного тока, и их электромагнитное поле взаимно поглощается в центре. При прохождении частицы по датчику, центральная катушка регистрирует возмущение электромагнитного поля каждой из них. Датчик определяет размер, массу ферромагнитной частицы размером от 125 мкм, неферромагнитной размером от 1000 мкм в потоке $\frac{1}{2}$ дюйма (12.7 мм) скоростью 3.7 л/мин. Сигналы от ферромагнитной и неферромагнитной частиц имеют противоположную фазу и их можно отличить друг от друга [34]. Для датчика, предназначенного под размер трубы 25 мм, минимальный диаметр обнаруживаемой ферромагнитной сферической частицы — 275 мкм. Для частицы неправильной формы возможность обнаружения определяется эквивалентным сферическим диаметром — 180 мкм [35].

Счётчик частиц QDM® состоит из одиночной регистрирующей катушки индуктивности и постоянного магнита для захвата частиц, обеспечивающего возможность их изъятия для дополнительного анализа и подтверждения повреждения [36; 37]. Датчик подсчитывает количество частиц размером от 400 до 600 мкм [38].

Определение массы индивидуальной частицы при помощи этих датчиков имеет погрешность вплоть до 370%. Эта погрешность зависит от траектории, формы и ориентации частиц. Тем не менее, возможен учет средней массы частиц [39].

При малых диаметрах и скоростях маслоструйки индукционные датчики могут обладать повышенной чувствительностью. Так, устройством в работе [40]

могут быть обнаружены ферромагнитные частицы размером при скорости движения жидкости $3 \cdot 10^{-6}$ л/мин в трубке внутренним диаметром 1 мм. Для увеличения производительности устройства с сохранением чувствительности формируется стойка из 3x3 отдельных каналов для датчиков, работающая при скорости потока в 0.46 л/мин [41].

Перспективными являются разработки с использованием постоянных магнитов вместо катушек индуктивности. Более высокая плотность магнитных линий позволяет увеличить чувствительность датчика. Так, в работе [42] разработано устройство на постоянных магнитах, позволяющее регистрировать ферромагнитные частицы размером от 83 мкм при скорости потока жидкости в 20 л/мин и диаметре трубы 12 мм. При переходе от внутреннего диаметра трубы датчика MetalSCAN 7.6 мм к 26.9 мм (увеличение в 3.5 раз), минимальный размер обнаруживаемой ферромагнитной сферической частицы меняется со 100 мкм до 275 мкм (в 2.75 раз) [35]. Поэтому можно ожидать, что для разработки на постоянных магнитах, минимальный размер частиц составит величину от 2 до 3 раз большую (170-250 мкм) в трубе 25 мм.

В работе [38] исследованы возможности датчиков QDM и MetalSCAN. Они были одновременно установлены на стенд маслосистемы двигателя. В стенд затем вводились ферромагнитные частицы неправильной формы трех различных диапазонов размеров: 850-1180 мкм, 425-600 мкм, 150-500 мкм по 10 мг для каждого диапазона (масса сферической частицы размером 1000 мкм составляет порядка 32 мг, т.е. общее количество частиц составляло десятки частиц). Каждое испытание повторялось 10 раз. Скорость прокачки масла составляла порядка 60 л/мин, диаметр потока — 12.7 мм ($\frac{1}{2}$ дюйма). По результатам испытаний, оба датчика регистрировали 60-70% от количества частиц в заявленных для них пределах чувствительности (250-1000 для MetalSCAN, 400-600 мкм для QDM). Это касается даже крупных частиц (600-1000 мкм).

Факт того, что отдельным датчиком регистрируется лишь часть (60-70%) частиц износа, свидетельствует о том, что накопленная масса будет

определяться со значительной погрешностью. Возникшая погрешность будет накапливаться при взаимной коррекции показаний нескольких датчиков, что не позволит в полной мере реализовать возможность селективной регистрации параметров частиц износа от отдельной функциональной системы двигателя.

В ОАО «Авиадвигатель» были проведены предварительные испытания датчика MetalSCAN в качестве контрольного устройства для двигателей нового поколения [43; 44]. По результатам испытаний, датчики MetalSCAN позволили обнаружить повреждение на 10 минут раньше штатной системы [45] (фильтры-сигнализаторы, стружка-сигнализаторы, датчики частиц); т.е., не было показано явных преимуществ по сравнению со штатной системой.

Известно, что при возникновении повреждения размер частиц может характеризоваться диапазоном от десятков мкм до тысячи мкм. При реальных размерах маслопровода 20–25 мм и скорости прокачки смазочного масла 40–60 л/мин, рассмотренные датчики начинают регистрировать ферромагнитные частицы размерами от 170–250 мкм, неферромагнитные от 500–700 мкм. Учитывая это обстоятельство, а также влияние траектории частицы и её формы на величину сигнала, можно ожидать, что повреждение в случае генерации частиц до 170 мкм может быть не выявлено датчиком, так же и как параметр — накопленная масса — не превысит граничное значение. Вероятно, данное ограничение датчика MetalSCAN привело к практически одновременному срабатыванию датчика и штатной системы при испытаниях в АО «ОДК-Авиадвигатель».

Таким образом, несмотря на более чем тридцатилетний опыт развития технологии встраиваемых устройств, создание бортовых систем для контроля технического состояния и оценки остаточного ресурса узлов трения маслосистемы авиационных ГТД является аппаратно ограниченным. Это ограничение связано с тем, что большинство разработанных в настоящий момент проточных датчиков и счетчиков частиц, основанных на оптическом, ультразвуковом, электрическом и других способах действия, не предназначено к условиям эксплуатации в маслосистеме авиационных газотурбинных

двигателей, когда скорость потока масла составляет порядка 40–60 л/мин, а диаметр потока — 20–25 мм. В таких условиях искажаются показания и ограничивается чувствительность датчиков к размеру регистрируемых частиц.

1.2 Наземная (лабораторная) аппаратура для контроля технического состояния узлов трения маслосистемы ГТД

Принято считать, что процесс износа может быть описан скоростью, типом, местоположением и величиной (степенью развития) повреждения, которые можно определить через измерение массовой доли, размера, морфологии и элементного состава частиц [2; 46–51] (см. табл. 1; знаком × обозначена связь характеристики износа и соответствующих параметров).

Таблица 1 — Взаимосвязь между параметрами металлических частиц и характеристиками износа

Параметры частиц	Характеристики износа			
	Величина повр.	Скорость	Тип	Местоположение
Массовая доля	×	×		
Размер	×	×	×	
Морфология	×		×	×
Состав				×

Наиболее важной задачей является определение типа износа. Без определения типа износа, не всегда возможно связать «массовую долю» и «размер частиц» со степенью развития повреждения. Например, в случае импульсного непериодического поступления частиц износа в маслосистему двигателя проба масла может не показывать увеличения «массовой доли». В этом случае и «размер частиц» окажется малоинформативным параметром.

Металлические частицы, поступающие в маслосистему двигателя, могут быть охарактеризованы несколькими типами износа [52]. Считается, что на

основе феррографических измерений можно установить общую картину износа агрегата и проследить за трендом процесса износа [53].

Наиболее часто встречается четыре типа износа: нормальный износ (износ трением), износ резанием, усталостный износ и износ скольжением. Проблема заключается в том, и это показано многочисленными исследованиями, что морфологические характеристики частиц зачастую перекрываются между разными типами износа [2; 54]. Так, например, при нормальном и усталостном износах частицы в обоих случаях имеют форму плоских тонких чешуек [54]. Такие перекрытия затрудняют правильность определения типа повреждения и, соответственно, прогнозирование его развития.

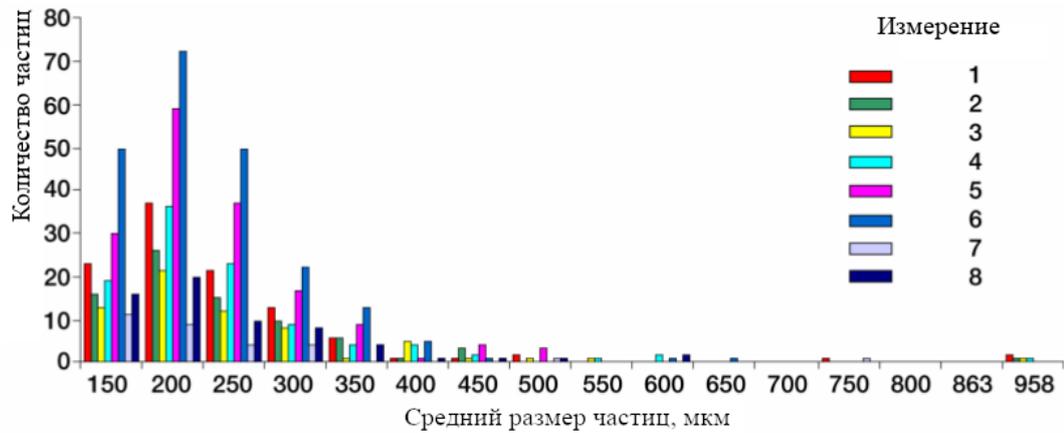
Другой пример: отмечается, что обнаруживаемые при феррографических исследованиях сферические частицы размером 2-5 микрометров являются диагностическим признаком, связанным с возникновением процесса выкрашивания в подшипниках качения [55], либо являются следствием кавитации, сваривания и подобных процессов [49].

При комиссионных длительных испытаниях двигателя Д30-КУ154 были обнаружены сферические частицы размером 2-5 микрометров, согласно акту-отчёту 207/037-502/98, замечаний по работе подшипников не было, разборка двигателей показала отсутствие очагов выкрашивания и в эксплуатации двигатель отработал без замечаний по подшипникам 7972 часа [56].

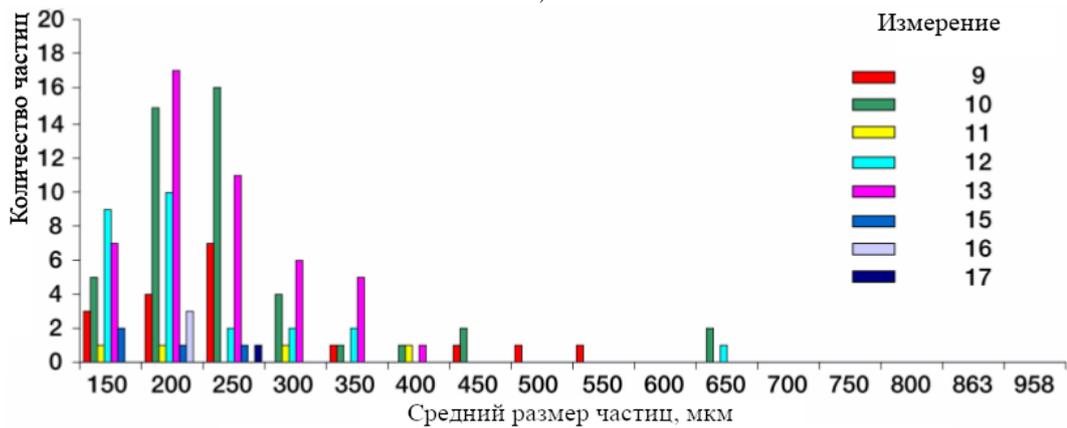
Таким образом, процесс повреждения деталей достаточно сложно охарактеризовать одним типом износа и поэтому при принятии диагностического решения необходимо учитывать и другие параметры частиц износа.

Попытки связать размер частиц с типом износа также оказались неоднозначными. Имеются сведения, что размер частиц может характеризовать тип износа [49; 57]. При размерах частиц до 15 микрометров, имеющих вид плоских чешуек, наблюдается нормальный тип износа, а при увеличении размеров частиц более 15 микрометров наблюдается повышенный износ [49; 55; 57]. С другой стороны, в работе [58] отмечается, что при обнаружении частиц

размером значительно более 100 микрон не наблюдается повышенного износа. При стендовых испытаниях шестерней и подшипников в случае наличия повреждения и его отсутствия распределения частиц по размерам [58] похожи между собой (см. рис. 1.1; номерами 1-17 обозначены отдельные испытания).



а)



б)

Рисунок 1.1 — Распределение частиц по размерам: а) — в случае визуального подтверждения выкрашивания зубьев шестерен; б) — в случае отсутствия видимых повреждений

Из рисунка 1.1 видно, что как при наличии выкрашивания зубьев шестерен, так и при его отсутствии, максимальный размер частиц составляет более 900 микрон. Отличие заключается в том, что при выкрашивании увеличение числа частиц в каждом классе становится более вероятным.

Представленный материал показывает, что повреждение может развиваться с выделением в масло частиц в широком диапазоне размеров — от нескольких десятков микрон до нескольких сотен микрон, поэтому

при оценке технического состояния с использованием диагностического признака «размер частиц» необходимо подходить с осторожностью.

В реальном случае, когда в маслосистеме протекает несколько процессов износа одновременно, картина ещё более усложняется, поскольку происходит смешивание частиц износа из различных источников. Так, в работе [58] дополнительно выявлено, что при использовании данных о размерах частиц износа невозможно разделить оценить износ шестерен и подшипников при совместном нахождении их в одной маслосистеме. Для отдельной оценки технического состояния зубчатых колес и подшипников необходимо иметь сведения по элементному составу частиц.

Отдельные совокупности параметров из представленных ранее в таблице 1 могут быть измерены при помощи рентгеноспектрального, атомно-эмиссионного и феррографического методов. По данным ПАО «ОДК-Сатурн», достоверность диагностики двигателей Д30-КП/КУ/КУ-154 по результатам рентгеноспектральных измерений параметров частиц износа в пробе масла не превышает 5-7% [3], по результатам атомно-эмиссионных и феррографических измерений на земле ни разу не было выявлено повреждение подшипника ТВД двигателя ПС-90А [59]. Аналогичная картина наблюдалась для двигателя J52 при диагностике подшипника 4 1/2 – результаты атомно-эмиссионных измерений в пробе масла не позволяли выявлять повреждение данного подшипника, даже при условиях, когда период отбора проб составлял всего 10 часов [60; 61].

Эти данные свидетельствует о том, что при принятии диагностического решения, руководствуясь лишь частью параметров частиц износа, высока вероятность диагностического промаха.

Исключением является случай, когда наблюдается часто повторяющееся повреждение с постепенным увеличением массовой доли металлических частиц в системе смазки. Тогда с применением спектрографических методов всегда можно достаточно точно оценить техническое состояние узлов, омываемых маслом, на момент измерения, и, при соответствующей

периодичности отбора проб на анализ, оценить остаточный ресурс. Так, при использовании атомно-эмиссионного метода для диагностики двигателя АЛ-7Ф-1, уверенно выявлялось и отслеживалось до предотказного состояния повреждение среднего подшипника компрессора и подшипника ТВД. Было своевременно снято с крыла более 280 двигателей, достоверность диагностики составила 92% [62].

Приведённые выше рассуждения и выводы касались оценки технического состояния маслосистемы авиадвигателей по результатам анализа пробы масла спектральным и феррографическим методами. Однако имеется еще одна проблема, которой ранее не уделялось достаточного внимания. Речь идет об использовании маслофильтров в системе смазки двигателя с тонкостью фильтрации порядка 15 микрон. Такая тонкая фильтрация позволяет почти на порядок увеличить ресурс узлов и агрегатов двигателя, омываемых маслом [63].

В авиационных ГТД система подачи масла к агрегатам устроена таким образом, что более 95% частиц износа осаждаются на маслофильтре и поэтому фактически полную информацию о процессах износа несут частицы, накопленные на маслофильтре. Подтверждением сказанного являются результаты эксплуатационной проверки многоэлементного атомно-эмиссионного анализа проб масел при диагностике двигателей ПС-90А, показавшей, что величина массовой доли элементов находится на уровне предела обнаружения метода и не может быть использована для достоверной оценки технического состояния двигателя [64].

При оценке технического состояния по результатам анализа пробы масла диагностическими признаками могут являться абсолютные значения массовой доли и количество частиц [65]. Однако, при анализе пробы смыва с маслофильтра эти и другие абсолютные параметры в общем случае зависят от времени работы маслофильтра, условий эксплуатации двигателя, тщательности промывки фильтра и других обстоятельств, не поддающихся учету.

В работе [66], с учетом важности оценки технического состояния по результатам анализа пробы смыва с маслофильтра, эта проблема решалась следующим образом.

Была разработана автоматизированная система промывки маслофильтра. После промывки маслофильтра полученная проба пропусклась через счётчик частиц MetalSCAN и высаживалась на мембранный фильтр с размером пор 20 микрометров. Далее с помощью рентгеноспектрального анализа определялось процентное содержание элементов на мембранном фильтре. С помощью данного устройства (FilterCHECK 300) и разработанной технологии были определены диагностические признаки, которые позволили выявить повреждение на ранней стадии развития подшипника 4 1/2 в двигателе J52. Достоверность выявления повреждения данного подшипника составила порядка 95% [61; 67; 68]. По словам одного из авторов, Гэри Хампфри, с помощью разработанной технологии удалось «...спасти 58 самолетов EA-68 Prowler, что приравнивается к 765 миллионам долларов и 116 человек экипажа» [69]. Однако, данные о применении разработанной технологии для выявления повреждений в других узлах двигателя J52 и других типов двигателей отсутствуют. Вероятнее всего, отсутствие этих данных связано с узкой специализацией разработанного оборудования.

Следует отметить одну особенность при диагностировании системы смазки ГТД. В случае часто повторяющегося повреждения, как это наблюдалось для двигателя АЛ-7Ф1, было предложено оборудование и разработана высокодостоверная (достоверность более 90%) технология выявления повреждения действительно на ранней стадии развития и сопровождении его до предотказного состояния [62].

Однако попытки внедрения данной технологии на другие типы двигателей и диагностирования других узлов и агрегатов имели недостаточный успех. Достоверность диагностики двигателей Д30-КП/КУ/КУ-154 в целом снизилась до 5-7%.

В двигателях Д30-КП/КУ/КУ-154 нередко наблюдалось повторяющееся повреждение межвального роликоподшипника, которое не выявлялось по результатам анализа пробы масла традиционными методами. Для диагностики данного подшипника был разработан специальный прибор ИВУ-1М, позволивший предпринимать упреждающие меры до разрушения роликоподшипника. Прибор оказался узкоспециализированным – с его помощью повреждение других подшипников (ТВД, КВД и др.) не обнаруживалось.

Схожая картина с часто повторяющимся повреждением наблюдалась при диагностике двигателя J52. Здесь также для диагностики подшипника 4 1/2 было разработано специальное оборудование, технология и найдены диагностические признаки, позволяющие своевременно выявлять повреждение до наступления катастрофических последствий.

В работе [68] сообщается, что: «Разработанная технология может быть мощным инструментом в идентификации поврежденных подшипников и способствовать своевременной их замене». Однако, в данной и последующих статьях не сообщается о возможности применения разработанной технологии для других типов узлов трения двигателя J52 или других типов двигателей, несмотря на многолетний срок развития технологии.

Следовательно, наиболее простой задачей получения достоверных результатов являются повторяющиеся повреждения. В этих случаях, вероятно, превалирует один механизм износа, что даёт возможность найти эффективные диагностические признаки для этого узла и сопровождать развитие повреждения до предотказного состояния.

Имеется ещё одна проблема, по которой практически отсутствуют сведения при диагностике двигателей по параметрам частиц износа. Дело в том, что некоторые элементы в пробе масла (смыва с маслофильтра) могут одновременно находиться в виде частиц износа и в виде присадки. Например, молибден может использоваться в виде противозадирной присадки, в то же

время он входит в состав подшипниковой стали М50, кремний используют в виде противопенной присадки и может попадать в маслосистему в виде грязи из окружающей среды, алюминий может характеризовать износ корпуса маслоагрегатов, а также попадать в маслосистему извне в виде Al_2O_3 и др. соединений.

Подводя итоги, есть лабораторные методы, позволяющие в отдельности проводить измерения параметров частиц износа в пробе масла, как то: массовая доля, размер, морфология и элементный состав частиц. Длительный опыт использования данных методов показал недостаточную достоверность оценки технического состояния. Имеется несколько проблем, без решения которых сложно достичь высокой достоверности оценки технического состояния:

1. Выявление типа износа, что определяет дальнейшие диагностические действия;
2. Получение информации о количестве частиц и их элементном составе во всем диапазоне размеров их генерации;
3. Получение отдельной информации об элементах, находящихся в виде присадок и частиц износа;
4. Для диагностирования двигателей новых поколений, оснащенных маслофильтром с тонкой фильтрацией, должна быть решена задача по нахождению диагностических признаков для пробы с маслофильтра.

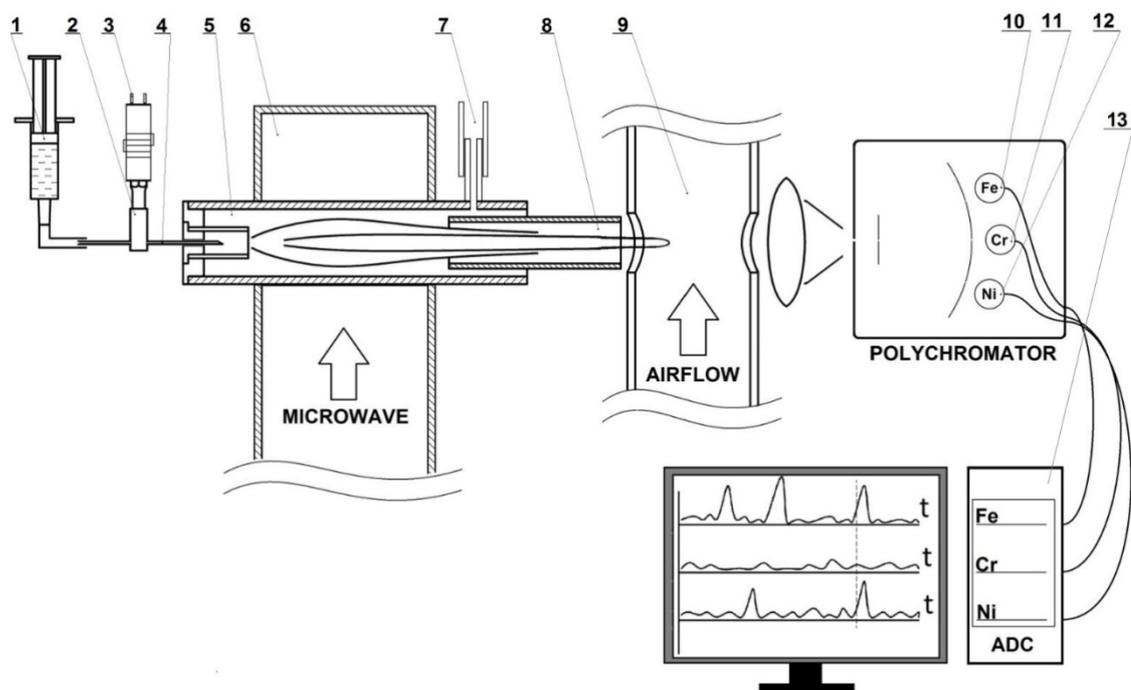
1.3 Атомно-эмиссионный СВЧ-плазменный метод элементного анализа

Для решения проблемы диагностирования узлов трения маслосистемы авиационных ГТД может быть использован атомно-эмиссионный СВЧ-плазменный (сцинтилляционный) метод измерения параметров частиц

износа в пробах авиационных масел, разработанный в институте прикладной физики ИГУ.

По данным ПАО «ОДК-Сатурн», достоверность оценки технического состояния и локализации поврежденного узла маслосистемы двигателей Д30КП/КУ/КУ-154 при контроле СВЧ-плазменным методом за 2000–2008 г. составила не менее 90% [70]. Указанные двигатели оснащаются маслофильтром МФС-30 с величиной ячеек порядка 70 мкм. Метод может успешно использоваться для диагностирования и других типов двигателей, в которых установлены тонкоячеистые фильтроэлементы типа PALL — ПС90-А, изделие 117 [71; 72].

Блок-схема работы СВЧ-плазменного анализатора приведена на рисунке 1.2.



1 – шприц-дозатор; 2 – распылитель; 3 – разъем подачи транспортирующего газа; 4 – распыляющий капилляр, 5 – плазменная горелка; 6 – волновод (резонатор); 7 – разъем подачи плазмообразующего газа; 8 – выхлопная труба плазменной горелки; 9 – система удаления продуктов горения; 10-12 – фотоумножители; 13 – компьютер.

Рисунок 1.2 — Блок-схема СВЧ-плазменного анализатора масла

Предварительно отобранная и подготовленная (обработанная ультразвуковым диспергатором) для анализа проба масла объёмом 1 миллилитр отбирается в одноразовый шприц-дозатор (1), из которого с помощью привода от шагового двигателя масло равномерно подаётся через пластиковый капилляр в ультразвуковой распылитель (2). За счет поперечных колебаний распыляющего капилляра (4) поступающий в распылитель поток масла превращается в мелкодисперсный аэрозоль, состоящий из капель жидкости размером 15-25 мкм и металлических частиц, находящихся в пробе. Поток транспортирующего газа (3) с расходом 0.2 л/мин аэрозоль непрерывно, в течение 10 минут, вдувается в источник возбуждения спектров — воздушную плазму газового разряда СВЧ-плазмотрона циклонного типа (5). Температура плазмы составляет порядка 5200 К [73].

Радиочастотное СВЧ излучение, подаваемое по волноводу (6), поддерживает СВЧ-разряд атмосферного давления в разрядной камере, образованной цилиндрической кварцевой трубкой и выходным соплом (8). Плазмообразующий газ подаётся тангенциально через штуцер (7) завихрителя и выходит через выходное сопло, нагревшись в СВЧ плазме. Продукты сгорания масла и металлического пара выбрасываются через выходное сопло и отводятся наружу с помощью устройства (9) [73].

Для лабораторного образца радиочастотное СВЧ излучение генерируется прибором SM-1250 (MKS Instruments), с установленной мощностью 2000-2200 Вт.

При попадании в плазму капли масла сгорают, а металлические частицы мгновенно нагреваются и испаряются. Полученный атомный пар возбуждается, т.е. происходит вспышка излучения (сцинтилляция) от каждой испарившейся частицы.

Излучение атомного пара фокусируется конденсором и направляется в полихроматор, после чего разлагается в спектр и регистрируется фотоумножителями (10-12).

Скорость поступления анализируемой пробы выбрана такой, чтобы вероятность поступления в плазму одновременно нескольких частиц микронных размеров была минимальна — в идеале, частицы должны поступать по одной. В результате на выходе фотоумножителей образуется последовательность отдельных импульсов различных длительностей и амплитуд. Длительность импульса излучения частицы пропорциональна времени нахождения ее в плазме и может составлять от 1 мс до 10 мс [74]. Электрические импульсы с фотоумножителей поступают на преобразователь ток-напряжение и далее обрабатываются аналого-цифровым преобразователем, установленным в ПК (13). При частоте дискретизации 10 КГц на канал, отбор значений происходит с периодом в 100 мкс, т.е. для импульса длительностью 1 мс может быть зарегистрировано 10 значений сигнала в разные моменты времени.

Информация по каждой анализируемой пробе обрабатывается программным обеспечением и записывается в базу данных.

СВЧ-плазменный анализатор позволяет одновременно по 16 элементам получить следующую информацию о металлической примеси, содержащейся в жидкой пробе:

1. $[C_{\text{ч}}, \text{г/т}]$ — массовая доля элемента, находящегося в пробе в виде частиц износа с эффективным размером более 2 мкм;
2. $[N, \text{см}^{-3}]$ — общее число зарегистрированных импульсов для элемента (содержание остальных элементов частицы оказывается ниже предела обнаружения прибора);
3. $[N_{\text{пр}}, \text{см}^{-3}]$ — число «простых» частиц, формируемых импульсом только одного элемента;
4. $[D, \text{мкм}]$ — средний размер частиц для элемента;
5. Количество «сложных» частиц различных элементных составов (Al-Ni, Cr-Fe и т. д.).

Одновременное экспрессное измерение этих признаков ранее не было доступно ни одному методу.

Измерение количества сложных частиц доступно благодаря программной реализации счетчика совпадений, аналогичного описанному в работе [75]. Регистрация сложной частицы происходит при совпадении по времени появления двух или более импульсов на каналах различных элементов.

Прибор зарегистрирован в госреестре СИ № 64278-16 [76], аттестовано измерение по 8 элементам. Предел обнаружения массовой доли элемента составляет $0.01 - 0.5 \text{ млн}^{-1}$ для элементов Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag. Для ванадия измеряется только количество частиц. Погрешность анализа в рабочем диапазоне измеряемых содержаний составляет $25 - 30 \%$ (при вероятности $\alpha = 0.95$), в зависимости от содержания элемента.

Принятие диагностического решения осуществляется экспертным методом на основе статистической модели исправного двигателя, построенной по результатам измерений проб масла или смыва СВЧ-плазменным методом [71].

Для принятия диагностического решения по пробе смыва с маслофильтра были найдены следующие параметры:

1. $[V_{\text{общ.}}]$, ед — «коэффициент износа», отношение количества «сложных» частиц (из нескольких элементов) к «простым» (из одного элемента);
2. $[R_{\text{общ.}}]$, ‰ — вклад общего количества частиц износа, содержащих определённый элемент, в общее количество частиц износа, «рейтинг частиц износа для элемента»;
3. $[R_{\text{пр.}}]$, ‰ — вклад количества «простых» частиц износа определённого элемента в общее количество частиц износа «рейтинг простых частиц износа для элемента»;
4. $[R_{\text{сл.}}]$, ‰ — вклад количества «сложных» частиц износа определённого состава в общее количество частиц износа; «рейтинг сложных частиц» определённого состава, например Cu-Ag, Fe-Cr-Ni и т.д.

Считается, что параметр $V_{\text{общ.}}$ является индикатором общего технического состояния двигателя, поскольку ранее была замечена закономерность: чем меньше данный параметр, тем лучше состояние

трущихся поверхностей деталей двигателя и наоборот, увеличение данного параметра свидетельствовало о повышенном износе деталей двигателя [71; 77]. Эта зависимость в дальнейшем была подтверждена результатами микрорентгеноспектральных исследований. Параметр $V_{\text{элемент}}$ учитывает то же отношение, но для отдельного элемента.

Рейтинг частиц износа рассчитывается, как количество частиц определённого сорта, приходящихся на 1000 частиц износа. Считается [71], что этим устраняется влияние времени накопления частиц на фильтре, степени разбавления пробы и т. д.

Очевидно, что погрешность рейтинга будет тем ниже, чем больше зарегистрировано частиц износа. Опыт работы с пробами смывов показал, что при условии набора числа импульсов (частиц) за экспозицию порядка 2000 см^{-3} точность измерения рейтингов и показателей износа вполне достаточна для оценки технического состояния узлов трения авиационного двигателя.

Приведем пример принятия диагностического решения по анализу параметров примеси в пробе смыва с основного маслофильтра двигателя Д30-КП2. На анализ поступила проба смыва с МФС-30 в нефрас от 22.02.2017 после инцидента — сработало табло «стружка в масле». Двигатель №22069, наработка 169 часов после последнего ремонта. Была обнаружена стружка на фильтрах-сигнализаторах. В таблицах 2, 3 содержится фрагмент протокола измерения параметров примеси в пробе смыва с основного маслофильтра двигателя. В таблице 2 приведены параметры, определяемые для отдельного элемента. В таблице 3 приведены рейтинги и количество частиц различных составов. В ячейках таблиц 2, 3 фоном и жирным шрифтом обозначены значения параметров, превысившие средние значения статистической модели исправного двигателя на 3 стандартных отклонения; фоном и курсивным шрифтом — менее чем на 3 стандартных отклонения, но более чем на 2.

По результатам СВЧ-плазменных измерений сделано заключение: «Сравнение параметров частиц износа в пробе смыва исследуемого двигателя с соответствующими параметрами статистической модели исправного двигателя

Таблица 2 — Фрагмент протокола анализа пробы смыва двигателя Д30-КП. Параметры, определяемые СВЧ-плазменным методом для отдельных элементов

Элемент	N, см ³	R _{общ} , ‰	N _{пр} , см ³	R _{пр} , ‰	D, мкм	V _{эле}
Al	1139.33	61.79	730	39.59	16.38	0.56
Cr	809.67	43.91	239	12.96	7.7	2.39
Ni	4653.33	252.35	2114.33	114.66	10.61	1.2
Mg	4824	261.61	3439.33	186.51	7.81	0.4
Fe	1536.33	83.32	852	46.2	8.51	0.8
Cu	5128.33	278.11	2408.67	130.62	4.81	1.13
Ag	345.67	18.75	213	11.55	7.16	0.62
V	3.33	0.18	0.33	0.02	<2	9

Таблица 3 — Фрагмент протокола анализа пробы смыва двигателя Д30-КП. Рейтинги и количество частиц сложных составов

Состав	Кол-во, см ³	Рейтинг, ‰
-Ni-Cu	1728	93.71
-Mg-Cu	240.67	13.05
-Cr-Mg	197.33	10.7
-Ni-Mg-Cu	177	9.6
-Ni-Mg	138	7.48
-Mg-Fe	111	6.02
-Al-Mg	81.67	4.43
-Fe-Cu	76.33	4.14
-Ni-Fe-Cu	52	<i>2.82</i>
-Al-Cu	40.67	2.21
-Al-Ni	31.67	1.72
-Al-Ni-Cu	31	<i>1.68</i>
-Cr-Ni-Fe	30.33	1.64
-Cu-Ag	25.67	1.39
-Cr-Ni-Fe-V	0.33	0.02

Д-30КП/КП2 показывает, что наблюдаются критические превышения только по частицам, связанным с никелем (Ni-Cu, Ni-Mg, Ni-Mg-Cu). Согласно статистической модели допустимое значение рейтинга Ni-Cu составляет 5.08, в исследуемом двигателе получено 93.71.

Рейтинги частиц, характеризующие состояние сепараторов подшипников, типа Fe-Cu, Cu-Ag, и беговых дорожек – Cr-Ni-Fe, Cr-Ni-Fe-V, низкие, что свидетельствует об исправности подшипников коробок приводов и трансмиссионной части двигателя, в частности, подшипников турбины высокого давления и межвального подшипника.

Допустимое значение рейтинга Cr-Ni-Fe (беговые дорожки и тела качения подшипников, изготовленных из стали ШХ-15Ш) составляет 2.21, получено – 1.64. Незначительное количество частиц ванадия свидетельствует об исправности роликоподшипников турбины высокого давления и межвального роликоподшипника.

Отсутствие превышения рейтингов по составу частиц Al-Mg, Mg-Cu, Al-Cu свидетельствует об исправности маслоагрегатов.

Вывод: источником повышенного значения параметров частиц Ni-Cu, Ni-Mg-Cu, вероятнее всего, является лабиринтное уплотнение двигателя. Рекомендуется эксплуатация двигателя под особым контролем.»

Обнаруженное повреждение не препятствовало дальнейшей эксплуатации двигателя и потому было рекомендовано оставить двигатель на крыле. По состоянию на 08.08.2019, двигатель находится в эксплуатации с наработкой 849 часов после последнего ремонта.

СВЧ-плазменный метод в принципиальном плане отвечает всем требованиям, обеспечивающим принятие высокодостоверного диагностического решения:

1. Большое число одновременно определяемых параметров продуктов износа в пробе масла и смыве с маслофильтра;

2. Найдены диагностические признаки, позволяющие связать техническое состояние двигателя с параметрами частиц, накопленными на маслофильтре;
3. Найдены признаки, позволяющую выполнить локализацию поврежденного узла.

Это обстоятельство является основанием по совершенствованию и дальнейшему использованию метода. Актуальным являлось решение следующих вопросов:

- На этапе создания лабораторного образца спектрометрах не были в достаточной степени проработаны теоретические и экспериментальные аспекты выделения и регистрации аналитического сигнала, формируемого примесью в форме крупных частиц износа (размером от 2 мкм), а также в форме растворённой примеси, включающей металл в форме раствора и частиц размером менее 2 мкм. Необходимо создание способа для отдельного выделения сигналов, формируемых этими компонентами примеси;
- От условий введения жидкой пробы в плазменную струю зависят метрологические характеристики спектрометра и, соответственно, достоверность принятия диагностического решения. Эти условия определяются техническими возможностями распылителя жидких проб в конструкции спектрометра. В оптимальном варианте требуется, чтобы распылитель обеспечивал узконаправленный поток аэрозоля с диаметром струи не более 2 мм на расстоянии 30–40 мм, средний размер капель аэрозоля 15–25 мкм, коэффициент вхождения металлических частиц износа на уровне 95%. Требуется создание распылителя, удовлетворяющего каждому из поставленных требований;
- Используемый подход к принятию диагностического решения на основе сравнения со статистической моделью исправного двигателя имеет опорный характер и требует высокой подготовленности диагноста. Общее количество диагностических параметров, определяемых при

СВЧ-плазменных измерениях, более 40. Так, в табл. 3 приведена лишь четверть элементных составов, присутствующих в протоколе. Из-за большого числа параметров и наличия случайных факторов проблемой является принятие диагностического решения. Поэтому необходим поиск решения, позволяющего автоматизировать этот процесс.

1.4 Математическая постановка задач диссертации

Целью диссертационного исследования является повышение достоверности диагностирования авиационных ГТД путем разработки новых научно обоснованных технических и технологических вопросов СВЧ-плазменного спектрометра.

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

$$\omega_{\text{ГТД}} = x_1, x_2, \dots, x_n \quad (1.1)$$

При этом существуют непосредственно 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 $\Delta_i \in \Delta$:

$$|x_i - x_i^*(s_1, s_2, \dots, s_m)| \leq \Delta_i \quad (1.2)$$

Диагностировании узлов трения маслосистемы ГТД аналитическими методами производится по величине параметров продуктов износа в пробах масла и/или смыва с маслофильтра, 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.

1.5 Выводы по главе

1. Создание бортовых систем для контроля технического состояния и оценки остаточного ресурса узлов трения маслосистемы авиационных ГТД в настоящий момент является аппаратурно ограниченным. Это ограничение связано с тем, что большинство разработанных проточных датчиков и счетчиков частиц, основанных на оптическом, ультразвуковом, электрическом и других способах действия, не предназначено к условиям эксплуатации в маслосистеме авиационных газотурбинных двигателей, когда скорость потока масла составляет порядка 40–60 л/мин, а диаметр потока — 20–25 мм. В таких условиях искажаются показания и ограничивается чувствительность датчиков к размеру регистрируемых частиц;

2. Повреждение может развиваться с выделением в масло частиц в широком диапазоне размеров — от нескольких десятков микрометров до нескольких сотен микрометров, поэтому при оценке технического состояния с использованием диагностического признака «размер частиц» необходимо подходить с осторожностью. В реальном случае, когда в маслосистеме протекает несколько процессов износа одновременно, картина усложняется, поскольку происходит смешивание частиц износа из различных источников. Так, при использовании данных о размерах частиц износа невозможно разделить износы шестерен и подшипников при совместном нахождении их в одной маслосистеме. Для отдельной оценки технического состояния зубчатых колес и подшипников необходимо иметь сведения по элементному составу частиц;

3. В авиационных ГТД система подачи масла к агрегатам устроена таким образом, что более 95% частиц износа осаждаются на маслофильтре и поэтому фактически полную информацию об процессах износа несут частицы, накопленные на маслофильтре. Так, по результатам эксплуатационной проверки многоэлементного атомно-эмиссионного анализа проб масел при

диагностике двигателей ПС-90А, было показано, что величина массовой доли элементов в пробе находится на уровне предела обнаружения метода и не может быть использована для достоверной оценки технического состояния двигателя;

4. Некоторые элементы в пробе масла (смыва с маслофильтра) могут одновременно находиться в виде частиц износа и в виде присадки. Например, молибден может использоваться в виде противозадирной присадки, в то же время он входит в состав подшипниковой стали М50, кремний используют в виде противопенной присадки и может попадать в маслосистему в виде грязи из окружающей среды, алюминий может характеризовать износ корпуса маслоагрегатов, а также попадать в маслосистему извне в виде Al_2O_3 и др. соединений;

5. Для решения проблемы диагностирования узлов трения маслосистемы авиационных ГТД может быть использован атомно-эмиссионный СВЧ-плазменный (сцинтилляционный) метод измерения параметров частиц износа в пробах авиационных масел. Длительный опыт эксплуатации лабораторного образца СВЧ-плазменного спектрометра выявил ряд технических и программных ограничений, не позволяющих в полной мере реализовать достоинства прибора. К таким ограничениям, которые решались настоящей работой, относятся следующие:

- На этапе создания лабораторного образца спектрометра не были в достаточной степени проработаны теоретические и экспериментальные аспекты выделения и регистрации аналитического сигнала, формируемого металлической примесью и частицами износа;
- От условий введения жидкой пробы в плазменную струю зависят метрологические характеристики спектрометра и, соответственно, достоверность принятия диагностического решения. Эти условия определяются техническими возможностями распылителя жидких проб в конструкции спектрометра. В оптимальном варианте требуется, чтобы распылитель обеспечивал узконаправленный поток аэрозоля с диаметром струи не более 2 мм на расстоянии 30–40 мм, средний размер

капель аэрозоля 15–25 мкм, коэффициент вхождения металлических частиц износа на уровне 95%. Требуется создание распылителя, удовлетворяющего каждому из поставленных требований;

- Используемый подход к принятию диагностического решения на основе сравнения со статистической моделью исправного двигателя имеет опорный характер и требует высокой подготовленности диагноста. Общее количество диагностических параметров, определяемых при СВЧ-плазменных измерениях, более 40. Так, в табл. 3 приведена лишь четверть элементных составов, присутствующих в протоколе. Из-за большого числа параметров и наличия случайных факторов проблемой является принятие диагностического решения. Поэтому необходим поиск алгоритмов, позволяющих автоматизировать этот процесс.

Глава 2. Разработка ультразвукового распылителя жидких проб для СВЧ-плазменного спектрометра

СВЧ-плазменный метод предполагает анализ жидких проб с присутствием металлической примеси как в форме дискретных частиц, так в форме растворённой примеси. Проба должна быть преобразована в аэрозоль и переведена в высокотемпературную зону источника возбуждения спектров, где металлическая примесь будет атомизирована и может быть зарегистрирована в виде атомных спектров излучения.

В качестве источника возбуждения спектров используется СВЧ-плазмотрон циклонного типа оригинальной конструкции [78]. Плазменное образование имеет горизонтальную веретенообразную форму с диаметром высокотемпературной зоны 6 мм (максимальная температура на оси — 5200 К, на краях — 4500 К). Плазменный разряд (для лабораторного образца) поддерживается СВЧ-генератором SM1250 (MKS Instruments), работающим на мощности 2000-2200 Вт.

Для классических способов анализа (атомно-эмиссионного, атомно-абсорбционного) доля аэрозоля, попадающего в разряд (пламя) не критична для результатов измерений и составляет всего 1-5% от общего количества [79]. При СВЧ-плазменных измерениях, где металлическая примесь может находиться в двух формах (металлоорганической и в виде отдельных металлических частиц), необходимым условием является близкое к 100% вхождение частиц металла в плазму. Причем, с целью снижения влияния температурных градиентов плазмы на аналитический сигнал, частицы должны проходить вблизи приосевой зоны плазменного образования.

В процессе эксплуатации лабораторного образца СВЧ-плазменного спектрометра с различными способами распыления жидких проб были сформулированы близкие к оптимальным параметры распыления жидкости и условия ее ввода в плазму:

1. Струя аэрозоля имеет форму узконаправленного пучка диаметром не более 2 мм на расстоянии 30–40 мм от конца распыляющего капилляра;
2. Средний диаметр капель аэрозоля в диапазоне 15–25 мкм;
3. Равномерное поступление аэрозоля в плазму, без разрывов и пульсаций;
4. Количество частиц износа, попадающих в плазму с формированием аналитического сигнала (коэффициент вхождения) выше 80%;
5. Расход транспортирующего газа 0.2 л/мин;
6. Производительность (расход пробы) распылителя 100–200 мкл/мин.

Выполнение условия (1) обеспечивает движение металлических частиц вблизи приосевой зоны плазмы, что увеличивает долю полностью испарившихся металлических частиц (коэффициент вхождения пробы). Условие (2) связано с тем, что крупный диаметр капель аэрозоля приводит к увеличению масляной оболочки частиц анализируемой примеси, что затрудняет полное испарение даже мелких частиц, в результате чего понижается коэффициент вхождения. Кроме того, увеличивается вероятность попадания нескольких крупных (более 2 мкм) частиц в одну масляную оболочку, и поэтому элементный состав частиц может определяться с погрешностью. Также, крупный размер капель аэрозоля приводит к неустойчивости и срыву плазменного образования. Аналогичный эффект оказывает наличие пульсаций при распылении (3).

Согласно электронно-зондовым измерениям, максимум распределения частиц износа по диаметрам приходится на 15–25 мкм в пробах масла исправных двигателей 3–4 поколений (Д30КП/КУ/КУ-154), и в пробах фильтра двигателей 5–6 поколений (ПС-90А, ПД-14). Соответственно, для оптимального диаметра капель можно установить верхнюю границу в 25 мкм.

С уменьшением коэффициента вхождения (4) уменьшается выборка сигналов пробы и, как следствие, возрастает погрешность отдельного измерения. При испытаниях различных конструкций распылителей, было отмечено, что коэффициент вхождения имеет максимальное значение при расходе транспортирующего газа 0.2 л/мин или менее (5). По всей видимости,

это связано со спецификой источника возбуждения спектров — малый расход газа обеспечивает лучшее смешивание горячего и холодного газов, и, таким образом, аэрозоль попадает в высокотемпературную область плазмы с большей вероятностью. В работе [80] отмечается аналогичное явление для двухструйного плазматрона — при расходе транспортирующего газа 0.2 л/мин наблюдается максимальная интенсивность излучения атомных и ионных линий.

Существующие промышленные распылители вязких жидкостей не удовлетворяют поставленной совокупности требований к условиям распыления, поэтому возникла необходимость в разработке оригинальной конструкции распылителя.

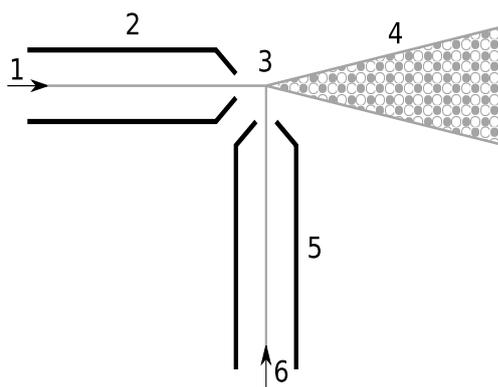
Так, при использовании гидравлического [81] (образование капель давлением нагнетания в форсунке) или механического [82] (образование капель отделением от вращающегося диска) способа получения аэрозоля сложно как организовать мелкодисперсное (15-25 мкм) распыление [83], так и стабильный, узконаправленный поток при малом расходе транспортирующего газа.

При электростатическом распылении [84], жидкости сообщается электростатический заряд ещё до её истечения или в момент истечения. Под действием кулоновских сил пленка жидкости распадается на капли таких размеров, при которых силы взаимного отталкивания капель уравниваются силами поверхностного натяжения. Электризация распыляемой жидкости осуществляется путем подвода потенциала к штуцеру распылителя, электростатической индукцией, коронным разрядом и другими способами, и осуществляется в специализированных форсунках. Средний размер капель при этом формально будет зависеть только от плотности жидкостного заряда при условии, что размер капель не превосходит 10 мкм и жидкость является ньютоновской с вязкостью не более 250 сПз [85]. При распылении керосина и дизельного топлива данным методом может быть получен средний размер капель более 100 мкм [86; 87], металлической краски — от 24 мкм [88]. Распыление топлива и краски является основным применением

этого метода. В качестве недостатков приводятся сложность обслуживания, дороговизна и высокое энергопотребление оборудования [83].

При пневматическом способе распыления жидкость разделяется на капли путем взаимодействия с потоком газа. Перекрестные пневматические распылители нашли широкое применение в методах атомно-эмиссионного анализа [89].

На рисунке 2.1 приведена общая схема перекрёстных распылителей [89].



1 – распыливающий газ (обычно аргон); 2 – газовый канал распылителя; 3 – точка встречи исходящих из распылителя потоков; 4 – аэрозоль; 5 – жидкостной канал распылителя; 6 – распыливаемая жидкость. Стрелками показаны направления движения жидкости и газа.

Рисунок 2.1 – Общая схема двухканальных распылителей с пересекающимися струями жидкости и газа

Диаметр выходных каналов (сопел) может быть таким же или меньше, чем у питающих каналов. В качестве одного из недостатков этого типа распылителей приводится [83; 89] высокая полидисперсность распыла — иными словами, встречаются крупные капли. Поэтому для их удаления дополнительно должны использоваться аэрозольные сепараторы, и как следствие — будет происходить потеря металлической примеси.

Другой проблемой является то, что достаточно сложно получить струю аэрозоля с диаметром, менее диаметра высокотемпературной области плазменного образования (6 мм). Значительная часть аэрозоля и металлических частиц будет проходить мимо высокотемпературной области.

Варианты этого вида распылителей с малой производительностью называются микрораспылителями. Для микрораспылителя НЕСFMN указан расход аргона 0.8-1.0 л/мин, а также производительность в пределах 5-12 мкл/мин. Для них остается актуальной проблема получения узконаправленной струи аэрозоля.

В предварительных испытаниях была исследована одна из конструкций этого вида распылителей [73] в целях применения к СВЧ-плазменному методу. В качестве транспортирующего газа использовался воздух в диапазоне расходования 0.2-2 л/мин. Жидкость расходовалась со скоростью 100–200 мкл/мин. Коэффициент вхождения пробы при расходе транспортирующего газа 0.2 л/мин составил порядка 20%; с увеличением расхода газа коэффициент вхождения резко снижался, уменьшалась стабильность поддержания плазменного образования.

При ультразвуковом способе распыления к жидкости подводится энергия в виде акустических колебаний, вызывающая на её поверхности капиллярные волны, с гребней которых отрываются капли жидкости [90]. Дисперсные характеристики капель при этом будут зависеть от режимов колебаний (частоты и амплитуды колебаний распылительной поверхности), свойств жидкости (вязкость, поверхностное натяжение), а также толщины слоя жидкости, покрывающей распылительную поверхность. Наличие таких зависимостей позволяет управлять размером капель и производительностью распыления за счет изменения частоты и амплитуды воздействия [90].

В качестве примера ультразвукового распылителя можно привести ультразвуковой фонтан [91]. Жидкость помещается на рабочий инструмент распылителя, выполненный в виде чаши или плоской поверхности, подверженной действию акустических колебаний. При таком способе возможно получение капель в единицах мкм. Направление капель может быть ограничено созданием воздуховода вокруг чаши и использованием потока воздуха. Однако, при этом сложно создать достаточно узконаправленную струю и обеспечить равномерное распыление и подачу жидкости. Последняя проблема может быть

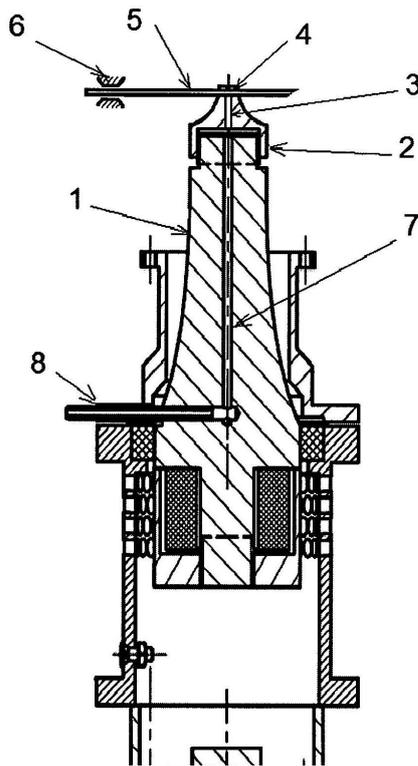
решена выполнением канала для подачи жидкости и/или транспортирующего газа в рабочем инструменте распылителя [92]. При этом однако теряются нужные дисперсные характеристики распыляемых капель жидкости.

2.1 Разработка конструкции ультразвукового распылителя и оптимизация её параметров

Распылитель в работе [93] показал наилучшее соответствие требованиям в ходе испытаний. Распыление происходит за счёт поперечных ультразвуковых колебаний распыляющего капилляра, имеющего внутренний диаметр 0.9 мм. При определенных условиях распылитель позволяет создавать непрерывную струю аэрозоля. Однако, значительную часть распределения капель по размерам составляла доля капель с диаметром до 300 мкм. Выполнение канала подачи жидкости внутри акустического волновода приводило к накоплению материала пробы, вводящую систематическую погрешность в повторяющиеся измерения. Преимущества конструкции стали основанием для её дальнейшего совершенствования.

В настоящей работе разработан распылитель вязких жидкостей (рис. 2.2) на основе ультразвуковой колебательной системы. Система выполнена из четырёх пьезокерамических колец. Диаметры колец составляют 19 мм (внутренний), 38 мм (внешний), а толщина – 5 мм.

Титановая (марка ВТЗ-1) насадка (2) устанавливается на акустический волновод (1) через резьбовое соединение. Внутри насадки выполнены каналы для подачи воздуха и жидкости (4), (3). В канал (4) выполняется посадка с натягом распыляющего капилляра (5) внутренним диаметром 0.75 мм, внешним 1.05 мм. Диаметры капилляра выбраны исходя из соображений получения узконаправленного потока (диаметром 2 мм). Материал капилляра — нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т. Для предотвращения механического



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.

Рисунок 2.2 — Ультразвуковой распылитель с поперечными изгибными колебаниями распыляющего капилляра

разрушения (обрыва) капилляра (5), входная часть закреплена скользящим зажимом (6). Канал подачи транспортирующего газа (7), выполнен по центру акустического волновода. Канал связывает капилляр (3) посредством отверстия в капилляре (5) со штуцером для подачи воздуха (8). Штуцер (8) расположен в зоне минимальных колебаний в целях исключения его разрушения. Конец выходной части распыляющего капилляра (5) заточен под углом и служит для распыления и формирования потока масляно-воздушной смеси. На разработанную конструкцию получен патент № 128521 (ПМ) [94].

Характер колебаний распыляющего капилляра оценивался следующим образом. Капилляр смоделирован в виде полого стержня, один конец которого свободен, а второй — закреплён на основании, подверженном воздействию

гармонической вынуждающей силы, соответствующей ультразвуковым колебаниям волновода.

Уравнение поперечных колебаний стержня со свободным концом длины l известно из литературы и имеет вид [95]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0; \quad a^2 = \frac{EJ}{\rho S} \quad (2.1)$$

здесь: E – модуль упругости, ρ – плотность, S – площадь поперечного сечения, J – момент инерции сечения относительно горизонтальной оси стержня.

Для стержня с диаметрами d_1 (внутренний) и d_2 (внешний):

$$J = \frac{\pi}{64} (d_2^4 - d_1^4) \quad (2.2)$$

Ищем решение уравнения (2.1) разделением переменных:

$$y(x, y) = Y(x) T(t) \quad (2.3)$$

Подставляя в уравнение, имеем:

$$\frac{T''(t)}{a^2 T(t)} = \frac{-Y^4(x)}{Y(x)} = -\lambda \quad (2.4)$$

Функция $Y(x)$ удовлетворяет уравнению:

$$Y^{(4)}(x) - \lambda Y(x) = 0 \quad (2.5)$$

Общее его решение:

$$Y(x) = A ch \alpha x + B sh \alpha x + C cos \alpha x + D sin \alpha x \quad (2.6)$$

где

$$\alpha = \sqrt[4]{\lambda} \quad (2.7)$$

Считаем конец в начале координат закрепленным, а в конце — свободным.

Накладываем соответствующие граничные условия на свободном конце:

$$Y''(l) = 0; \quad Y'''(l) = 0 \quad (2.8)$$

На закреплённом:

$$Y'(0) = 0 \quad (2.9)$$

Считаем закреплённый конец изменяющим положение согласно гармонической возмущающей силе $f(t)$, соответствующей акустическим колебаниям:

$$y(t, 0) = Y(0) T(t) = f(t) = F \cos \gamma t \quad (2.10)$$

В силу условий (2.8) и (2.9) в решении (2.6) только коэффициент A остается произвольным:

$$\begin{aligned} B &= -A \frac{ch\alpha l \sin\alpha l + sh\alpha l \cos\alpha l}{1 + ch^2\alpha l + sh\alpha l \sin\alpha l} \\ C &= A \frac{1 + ch^2\alpha l - sh\alpha l \sin\alpha l}{1 + ch^2\alpha l + sh\alpha l \sin\alpha l} \\ D &= -B \end{aligned} \quad (2.11)$$

Функция $T(t)$ удовлетворяет уравнению

$$T'' + a^2\lambda T = 0 \quad (2.12)$$

Общее решение

$$T(t) = c \cos \omega t + d \sin \omega t \quad (2.13)$$

где

$$\omega = a\sqrt{\lambda} \quad (2.14)$$

Накладываем условие (2.10) :

$$(c \cos \omega t + d \sin \omega t) Y(0) = F \cos \gamma t \quad (2.15)$$

откуда следует

$$\omega = \gamma, \quad \text{т.е.} \quad \lambda = \gamma^2 + \alpha^2 \quad (2.16)$$

Полное решение имеет вид:

$$y(x, t) = F \cos \gamma t \frac{Y(x)}{Y(0)} \quad (2.17)$$

Из (2.6) и (2.11):

$$Y(0) = A + C$$

$$Y(0) = 2A \frac{1 + ch^2 \alpha l}{1 + ch^2 \alpha l + sh \alpha l \sin \alpha l} \quad (2.18)$$

Т. к. A является множителем каждого слагаемого $Y(x)$ и $Y(0)$, то $\frac{Y(x)}{Y(0)}$ не зависит от A (и как следствие, $y(x, t)$ тоже). Таким образом, решение (2.6) полностью определено.

Соотношение амплитуд на свободном и закреплённом концах даётся соотношением:

$$K(l) = \frac{y(l, t)}{y(0, t)} = \frac{Y(l)}{Y(0)} = \frac{ch \alpha l + \cos \alpha l}{ch \alpha l \cos \alpha l + 1} \quad (2.19)$$

Нули знаменателя соотношения определяются уравнением:

$$ch \alpha l \cdot \cos \alpha l + 1 = 0 \quad (2.20)$$

Некоторые его решения:

$$\alpha l = x_i = 1.875; 4.694; 7.854; 10.9885 \dots \quad (2.21)$$

Из ((2.7) и (2.14)):

$$\alpha = \sqrt[4]{\lambda}; \quad \lambda = \frac{\gamma^2}{a^2}; \quad \gamma = 2\pi\nu \quad (2.22)$$

Отсюда:

$$l = x_i \sqrt{\frac{a}{2\pi\nu}} \quad (2.23)$$

или, эквивалентно:

$$\nu = \frac{ax_i^2}{2\pi l^2} \quad (2.24)$$

Решения (2.21) соответствуют условиям, когда частота вынуждающей силы совпадает с собственными частотами стержня. Выражение (2.19) при этом формально обращается в бесконечность — возникает «резонанс» конца стержня. Другими словами, при фиксированной частоте ультразвуковых колебаний возможно подобрать такую длину капилляра, при которой

произойдет усиление амплитуды колебаний свободного конца в сравнении с закрепленным (или, наоборот, усиления не будет вовсе). Соответствующие решения можно назвать «гармониками».

На рисунке 2.3 приведены графики «резонансной» длины для некоторых «гармоник».

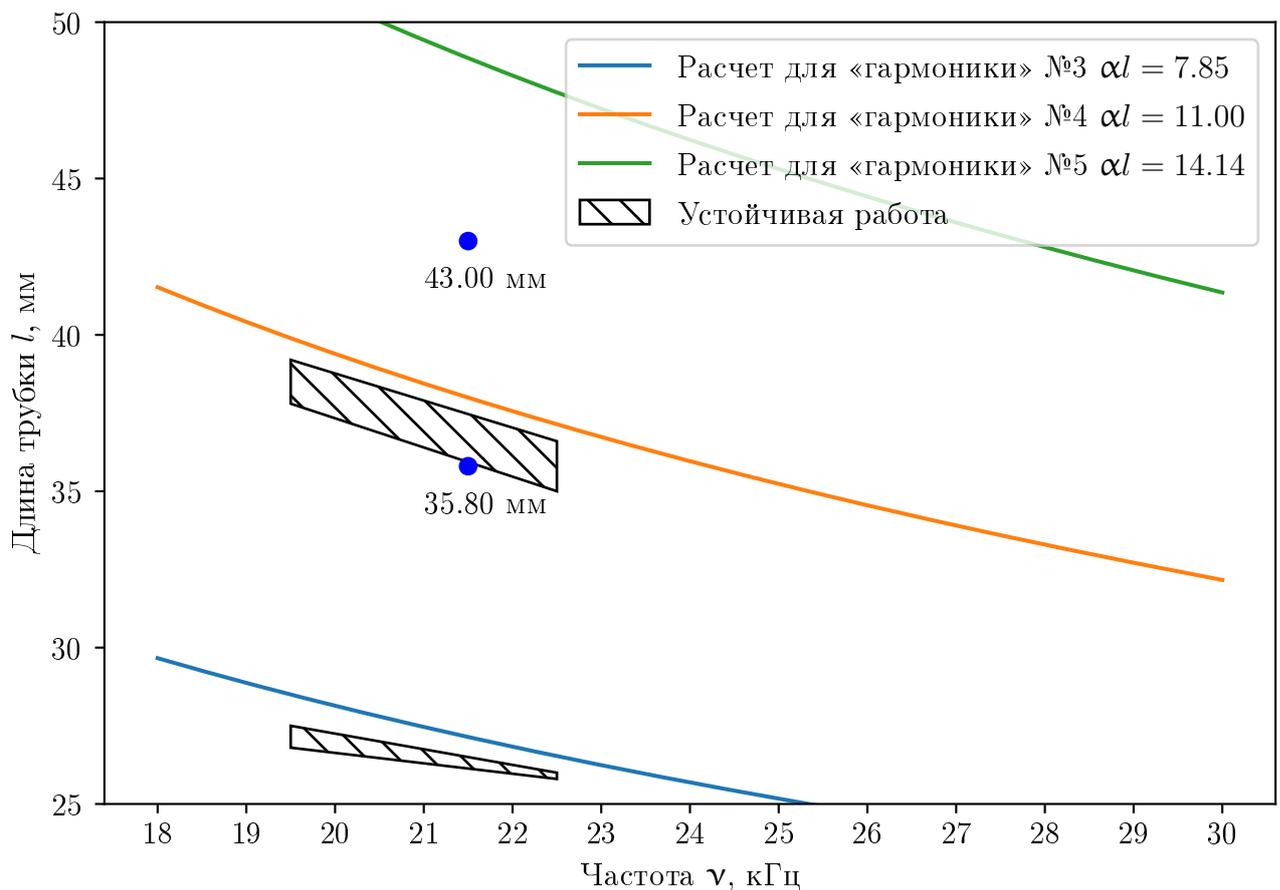


Рисунок 2.3 — Кривые обращения в бесконечность отношения амплитуд и области стабильной работы распылителя

В заштрихованных областях на рисунке 2.3 наблюдается стабильная работа распылителя. Это проявляется в следующем. Имеется сплошная струя аэрозоля, с диаметром 2 мм на расстоянии 30-40 мм от конца распыляющего капилляра. Геометрические размеры струи остаются постоянными в течении промежутков времени более 10 минут. При приложении рукой к основанию капилляра металлического стержня, ощущаются вибрации.

При изменении частоты или длины капилляра таким образом, что происходит приближение к «резонансной» кривой, зачастую наблюдается разрушение (обрыв) распыляющего капилляра. Промежуток от установления частоты до разрушения может составлять как несколько секунд, так и 6-10 часов. Струя аэрозоля при этом либо отсутствует, либо имеет переменные во времени размеры.

При удалении по частотам/длинам от «резонансной» кривой струя аэрозоля, как правило, отсутствует. Вибрации прикладываемого к основанию стержня при этом не ощущаются.

Полученные данные (рис. 2.3), относятся к капиллярам со срезом под углом 30° на торце. В случае среза, перпендикулярного оси капилляра, диапазон стабильной работы распылителя по частотам уменьшается и составляет 0.8 – 1 кГц.

С учетом полученных зависимостей, для подающей части капилляра, выступающей из насадки, была подобрана длина в 43 мм при частоте ультразвукового генератора 21.5 кГц. Такая длина позволяет проводить эксплуатацию распылителя без обрыва подающей части и без использования скользящего зажима. Для распыляющей, выходной, части капилляра была подобрана длина в 35.8 мм. Соответствующие точки отмечены на рисунке 2.3. Диапазон стабильной работы распылителя для капилляра этой длины составляет 21–22 кГц.

На рис. 2.4 представлена работа распылителя при частоте генератора 21.5 кГц и длине распыляющего капилляра (наружной её части, выступающей из насадки) 35.8 мм с перпендикулярным срезом.

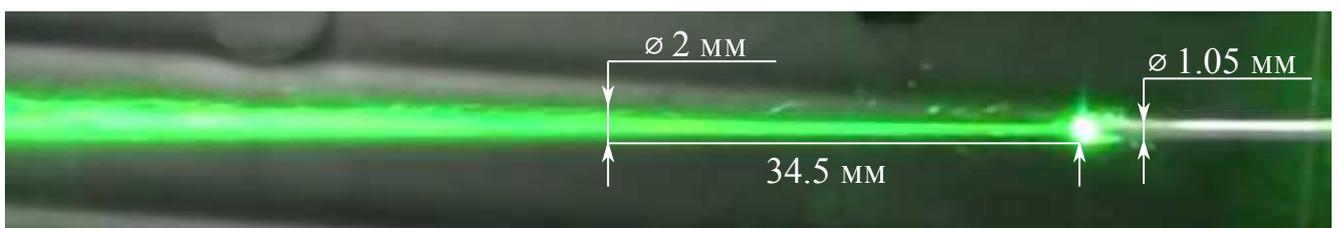


Рисунок 2.4 — Кадр видеосъемки работы распылителя для капилляра с перпендикулярным срезом

Условия эксперимента были следующие: авиационное масло МС-8П (вязкость 8 сСт) с помощью шагового двигателя подавалось на скорости 111 мкл/мин во входную часть распыляющего капилляра. Через штуцер подачи транспортирующего газа, (см. рис. 2.2), подавался воздух, со скоростью 0.2 л/мин. Струя аэрозоля была подсвечена расфокусированным до диаметра 7 мм лазерным лучом.

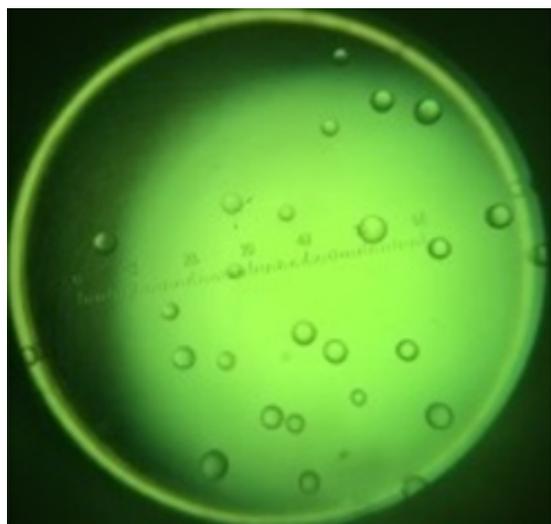
Рис. 2.4 показывает непрерывную горизонтальную струю, диаметр которой не превышает 2 мм на расстоянии 34.5 мм от конца распыляющего капилляра.

2.2 Измерение диаметра получаемых распылителем капель

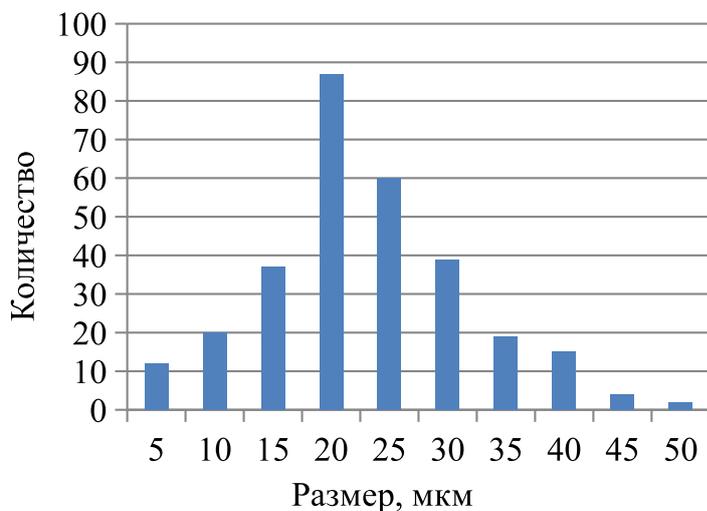
Дисперсные характеристики струи аэрозоля можно измерить множеством способов. Например, оборудование в работе [11] позволяет измерить скорость потока аэрозоля, размеры и направление движения частиц. В работе [96] описан более простой и доступный способ — капли аэрозоля наносятся на подложку и измеряются под микроскопом. Однако, при испытаниях этого способа для измерения капель авиационного масла МС-8П, капли имели неправильную форму, коагулировали, а их размер измерялся со значительной (более 50%) погрешностью.

Этот недостаток был устранен доработкой способа, заключающейся в следующем. Вместо подложки использовалась чашка Петри с поверхностно-активным веществом (ПАВ) слоем в 8-10 мм. Чашка отстаивалась в течение небольшого промежутка времени, достаточного для удаления больших пузырьков воздуха. Мелкие пузырьки воздуха удалялись механически с помощью шприца. Затем чашка помещалась под струей распыляемого аэрозоля на расстоянии 20-30 мм. Через 10-15 секунд отдельные области содержимого чашки фотографировались под микроскопом. На рисунке 2.5

представлен пример полученных фотографий распыленного масла МС-8П (а), измеренное распределение диаметра капель (б).



а)



б)

Рисунок 2.5 — Измерение диаметра капель масла по осаждению на ПАВ: а) — капли масла МС-8П, б) — гистограмма распределения капель масла по диаметрам

Разность диаметров внутренних (темных) и внешних (светлых) областей капли на фотографии может составлять до 10 мкм для крупных (от 80 мкм) капель; оценка размера проводилась по внешнему диаметру капли. Масло подавалось со скоростью 111 мкл/мин, при частоте ультразвуковых колебаний генератора 22 кГц и расходе транспортирующего газа 0.2 л/мин. В качестве эталона длины использовался оптический объект-микрометр ОМП-ОУ4.2 № 763980.

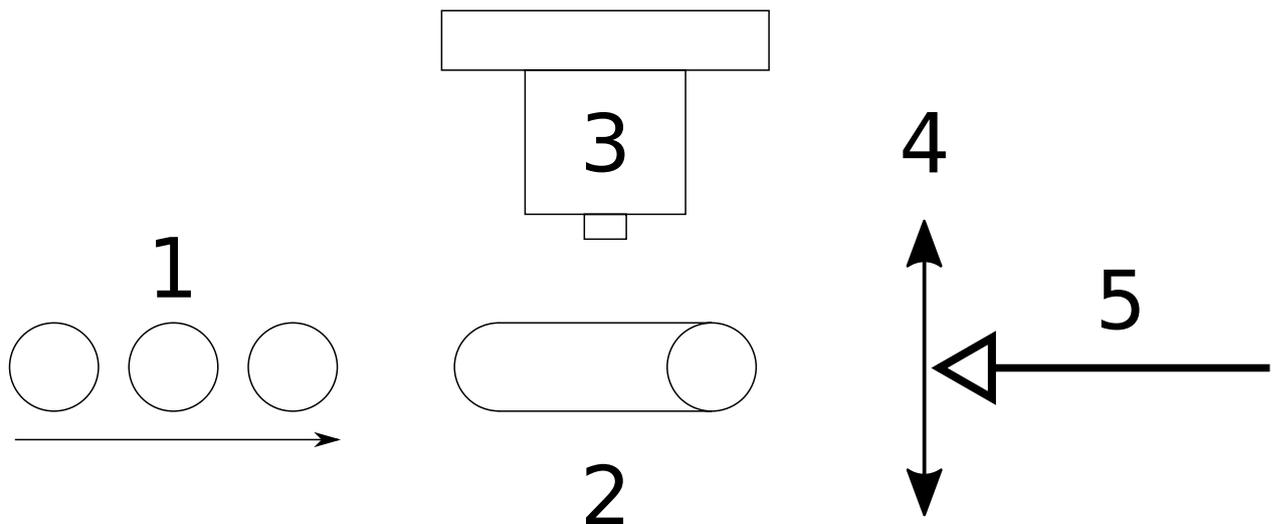
Среднее значение диаметра капель составило 25 мкм. Максимум распределения по размерам приходился на 20 мкм.

Описанный способ удобен тем, что позволяет достаточно просто разработать программное обеспечение для автоматизированной оценки диаметра капель. В простейшем варианте алгоритмы для оценки размеров эллиптических объектов преобразуют изображение в оттенки серого, и замкнутые участки с яркостью выше заданного уровня (например, на три

стандартных отклонения выше светлости фона) считаются каплями. После чего может быть определена площадь этих участков и пересчитана в диаметр капель.

В данном случае автоматизация осложняется тем, что капли имеют неравномерное освещение поверхности (см. рис. 2.5, а). Выше граничного значения может оказаться только часть капли. Поэтому сначала должна быть рассчитана карта высот, например при помощи алгоритма Френеля, позволяющая получить полные контуры капель. Контуры затем заполняются в сплошные участки. После этого диаметр капель может быть оценен предыдущим способом – посредством сравнения с граничным значением. На основе описанного алгоритма было создано соответствующее программное обеспечение и получено свидетельство на регистрацию ЭВМ.

Капли, осажденные на ПАВ, сохраняют форму и устойчивое положение в течении нескольких минут. Однако, при осаждении некоторые капли (в среднем 1 из 50) попадают на одну поверхность и коагулируют; на фотоснимках могут наблюдаться сдвоенные, сливающиеся капли. Это приводит к некоторому увеличению их средних диаметров. Поэтому размеры были исследованы дополнительным способом [97], суть которого заключается в следующем (см. рис. 2.6).



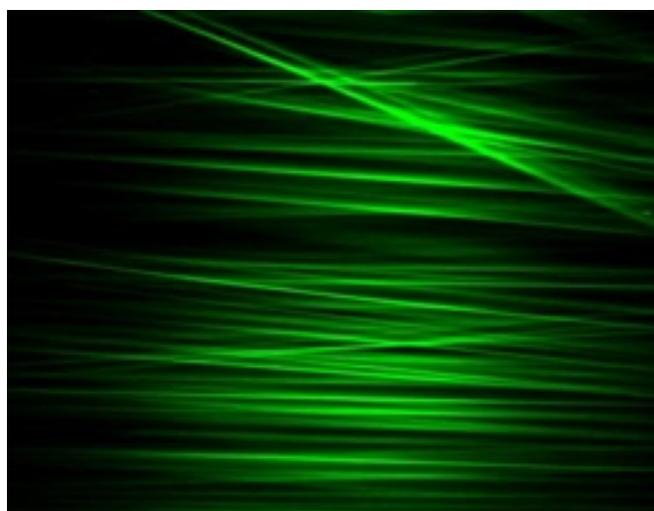
1 — поток аэрозоля, 2 — треки капель аэрозоля, 3 — объектив микроскопа, оснащенного видеосъемкой, 4 — цилиндрическая линза, 5 — лазерный луч.

Рисунок 2.6 — Блок-схема установки для измерения размеров капель по трекам

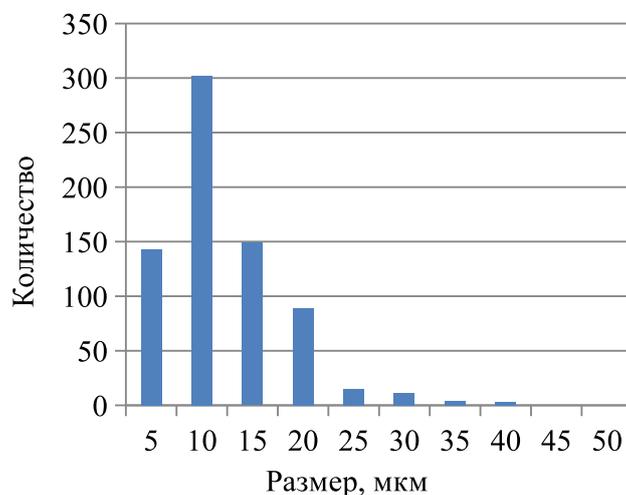
На рисунке изображена струя аэрозоля (1). На удалении в 20 мм, соответствующем условному плазменному образованию, расположен объектив микроскопа «Микромед-1» (3). Микроскоп оснащён видеосъёмкой с настраиваемым 40/100 кратным увеличением. Центр струи аэрозоля (2) проходит в фокальной плоскости объектива микроскопа.

Струя аэрозоля освещается лазерным лучом (5) с противоположной относительно распылителя стороны. Луч развернут в плоскость цилиндрической линзой (4). Капли, подсвеченные лазером, регистрируются в виде треков, ширина которых пропорциональна диаметру капли, а длина – скорости движения капли и длительности экспозиции. Диаметр капли оценивался с учетом изображения мерной шкалы при том же увеличении.

На рисунке 2.7 представлено изображение треков капли масла МС-8П в потоке, подсвеченном лазером (а) и распределение их по ширине (б). Средний диаметр капель получился равным порядка 12 мкм, а максимум приходится на 10 мкм.



а)



б)

Рисунок 2.7 — Измерение размеров капель масла по трекам: а) — треки капель масла, б) — гистограмма распределения ширины треков

По сравнению с предыдущим, данный способ измерения плохо поддается автоматизации. Это связано с тем, глубина резкости падает при 100-кратном увеличении: на снимках видно множество треков, имеющих нечеткие границы.

Для распределения на рисунке 2.7 отбирались и учитывались треки, имеющие резкие очертания границ.

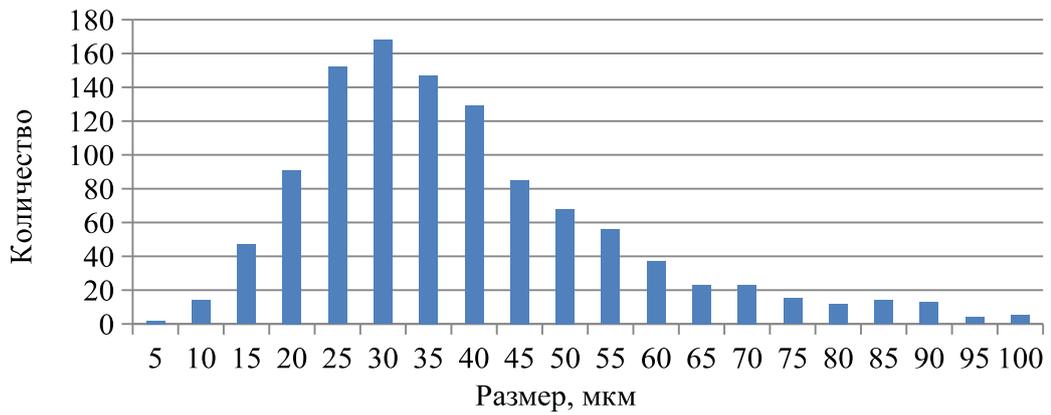
Другой проблемой является то, что полученное освещение капель, вероятно, получается неполным. Изменение отражения в разных местах на поверхности капли приводит к тому, что трек оставляет отдельная освещенная область капли, а не вся её поверхность. Это приводит к уменьшению среднего диаметра капель по сравнению с реальным.

Метод треков дополнительно проверялся посредством измерения треков частиц порошкового кварца. Распределение по размерам частиц кварца было предварительно измерено под микроскопом. Затем, сухой кварцевый порошок вводился в канал подачи жидкости ультразвукового распылителя и выводился транспортирующим газом на скорости 0.2 л/мин. Для подачи порошка использовался порошковый мембранный распылителя, аналог представленного в работе [98]. Полученное распределение треков представлено на рисунке 2.8, а) и сравнивалось с распределением частиц кварца, измеренным под микроскопом 2.8, б).

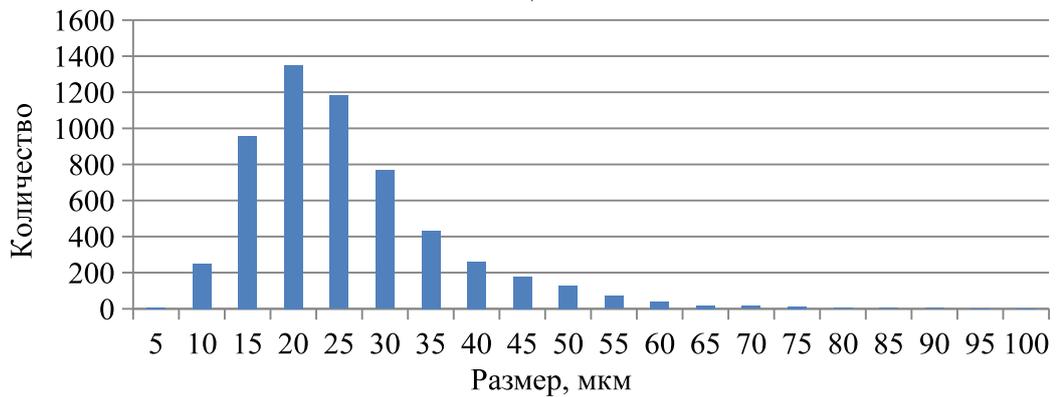
Проведенные измерения для порошка с содержанием Al имели аналогичный результат. Распределение частиц, построенное по измерениям ширины трека частиц несколько смещено вправо, максимум распределения приходится на 30 мкм. Это может быть связано с тем, что видимый размер некоторых треков частиц, проходящих ниже или выше фокальной плоскости объектива, увеличивается, давая, соответственно, увеличенный (в 1.5 раза или более) размер частиц.

Так как расход транспортирующего газа сравнительно невелик (0.2 л/мин), изменением формы капли масла, вызванным движением, можно пренебречь и считать её аналогичной твердой частице. Поэтому результаты на рисунке 2.8 можно учитывать при измерении ширины треков капель масла.

Предположим, что неравномерное освещение увеличивает диаметр капли в 3 раза, т.е. видна только её центральная область, а нижняя и верхняя затемнены. Возьмем поправочные коэффициенты, равные $\frac{2}{3}$ (увеличение,



а)



б)

Рисунок 2.8 — Распределение частиц SiO_2 по диаметрам: а) измеренным в газовом потоке по трекам; б) измеренным по фото с большим увеличением под микроскопом

вызванное оптическими эффектами) и 3. С их учетом, средний диаметр капель, измеренный по трекам, составит 24 мкм, что в пределах погрешности совпадает с результатами, полученными при измерениях путем осаждения капель на ПАВ.

Полученные результаты показывают, что максимальный диаметр капель масла МС-8П, получаемых разработанной конструкцией распылителя, не превышает 30–40 мкм (см. рис. 2.7). Максимум распределения приходится на 15–25 мкм, что соответствует поставленным требованиям к качественному вводу пробы.

2.3 Измерение гистерезиса измеряемых параметров и коэффициента вхождения пробы при эксплуатации распылителя

При проведении атомно-эмиссионного СВЧ-плазменного анализа, необходимо учитывать весь диапазон размеров частиц для получения достоверной оценки технического состояния узлов трения, омываемых смазочным маслом. Коэффициент вхождения пробы, т. е., доля частиц, попадающих в плазму и формирующих аналитический сигнал в виде импульсов, в идеале, должен быть близок к 100%.

Заметно, что некоторая часть капель аэрозоля, попадающего в плазму, не сгорает в нём полностью. Капли обтекают плазменное образование и оседают на поверхности плазмообразующей камеры. На дне камеры расположены дренажные отверстия, через которые капли попадают в слив. Сравнение результатов анализа содержимого слива и результатов первичных измерений позволяет оценить коэффициент вхождения пробы.

Для экспериментальной оценки коэффициента вхождения пробы была приготовлена проба масла с известным составом. В качестве такой пробы использовался восьмиэлементный порошковый стандартный образец (СО) СОЧПИ ГТД УНИИМ (ГСО 10696-2015), смешанный с маслом МС-8П в пропорции, позволяющей получить 10-16 импульсных сигналов от частиц в секунду. Этот показатель являет собой оптимум между максимальной частотой импульсов и минимальной вероятностью наложения их друг на друга, используемый при стандартной эксплуатации СВЧ-плазменного спектрометра. Общее количество импульсов за измерение (9 минут) составляет при этом 6-10 тысяч. С учетом длительности импульса 1-10 мс, было бы допустимо в целях настоящего эксперимента использовать более высокую долю СО.

При измерениях регистрировались «простые» частицы, состоящие преимущественно из одного (среди определяемых) элемента. Доля таких

составляет 85%-95% от общего количества. Поэтому, имеет смысл говорить о том, что одному импульсу соответствовала одна частица.

Измерялись объёмы распылённого масла, полученного слива, а главным образом — число частиц в исходной пробе и пробе слива, сформированной из всего объёма слива. Коэффициент вхождения пробы оценивался как отношение количества частиц в исходной пробе к общему количеству:

$$k = \frac{N_{\text{исх.}}}{N_{\text{исх.}} + N_{\text{слив}}} \quad (2.25)$$

где k — коэффициент вхождения пробы, $N_{\text{слив}}$ — количество частиц, зарегистрированное в «пробе слива», $N_{\text{исх.}}$ — количество частиц, зарегистрированное в первичных пробах СО СОЧПИ.

Для получения 7.5 мл слива потребовался анализ 28 проб (28 мл) стандартного образца СОЧПИ. Слив объёмом 7.5 мл позволяет провести СВЧ-плазменный анализ 7 раз с аналитической навеской 1 мл. Результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Результаты измерения коэффициента вхождения пробы

№	Элемент	$S_{\text{общ}}$, %	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	-

Так же в таблице указаны аттестованные значения массовой доли СО СОЧПИ под обозначением $S_{\text{общ}}$, и длины волн аналитических линии СВЧ-плазменного спектрометра для указанных элементов. Границы относительной погрешности аттестованных значений СО по элементам не превышают ±8%. Ванадий при расчетах не учитывался вследствие малого содержания в образце.

Среднее значение коэффициента вхождения по всем элементам составило 94%, что соответствует поставленным требованиям к качественному вводу пробы. Объем слива составил 26.8% от объема распылённых проб. Доля металлических частиц, попавших в слив, от общего их числа, изменялась в пределах от 3 до 12% между элементами, со средней величиной в 6%.

Соотношение объема слива (26.8%) и доли частиц в сливе (3-12%) изменяется от 2 до 8 раз. Это может свидетельствовать о том, что для масла труднее преодолеть температурный барьер плазмы, по сравнению с частицами, причиной чего может являться на порядок величины меньшая плотность.

Для оценки влияния накопления материала пробы предыдущего измерения на следующее (гистерезиса измеряемых параметров), 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:

$$k_{\text{ост.}} = \frac{N_{\text{ост.}}}{N_{\text{исх.}} + N_{\text{ост.}}} \quad (2.26)$$

Доля остаточного числа по элементам изменялась от 0.5 до 2.3%. Среднее значение $k_{\text{ост.}}$ составило 1.7%, что соответствует поставленным требованиям к качественному вводу пробы.

2.4 Выводы по главе

1. Теоретически исследована зависимость колебаний свободного конца распыляющего капилляра, закрепленного на основании, от параметров капилляра и частоты колебаний основания. Получено уравнение, выражающее эту зависимость. Показано, что при фиксированной частоте ультразвуковых колебаний основания можно подобрать длину распыляющего капилляра

таким образом, чтобы произошло формальное обращение в бесконечность соотношения амплитуды колебаний свободного конца распыляющего капилляра и амплитуды колебаний основания. Найдены диапазоны длин и частот, при которых наблюдается сплошная струя аэрозоля;

2. Разработан способ измерения капель жидкости путем осаждения их на поверхностно-активное вещество. Способ позволяет проводить измерение размеров капель смазочного масла без применения дорогостоящего оборудования. Разработано программное обеспечение, позволяющее производить автоматическое измерение размеров капель и построение распределения капель по диаметрам;

3. Разработан способ распыления смазочных масел и конструкция, обеспечивающая:

- диаметр струи аэрозоля 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 (может регулироваться в пределах 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;
- отсутствие распыляющей камеры — доля остаточного числа частиц совокупно по элементам составила 1.7% и не более 5%.
- замену распыляющей насадки или капилляра за 5-10 минут;

Работоспособность способа обеспечивается при частоте подводимых ультразвуковых колебаний 22 кГц. Длина распыляющего капилляра подобрана в 35.8 мм с учётом полученной зависимости колебаний свободного конца капилляра.

Глава 3. Способ формирования и выделения сигнала при СВЧ-плазменных измерениях

В традиционном подходе к анализу сцинтиляционных сигналов подсчитываются импульсы, соответствующие определенной аналитической линии при непрерывном вводе вещества в источник возбуждения спектров. Источники шума отсеиваются путем дискриминации импульсов по амплитуде [99].

Данный подход более сорока лет с успехом применялся и развивался для анализа порошковых проб на благородные металлы [75; 100; 101]. Решалась задача создания экспресс-метода измерения параметров частиц примеси благородных металлов. В частности, для золота измерялась массовая доля, пробность и размер частиц.

Поставленная задача была решена частично. Дело в том, что измеряемая металлическая примесь может находиться в виде равномерно распределенной примеси и частиц, размер которых настолько мал, что формируемые ими импульсы не дают превышения над аппаратурным шумом. В работе [102] показано, что такой примесью являются частицы, условный размер которых, как правило, не превышает 2 мкм. Реальный размер частиц, для которого прекращается регистрация импульсов, зависит от уровня аппаратурных шумов, настройки дискриминирующей аппаратуры, источника возбуждения спектров, элементного состава частиц и других факторов.

Неучет данной формы нахождения металла привел к тому, что данный метод в лучшем случае относился к классу полуколичественных.

В пробах масел авиационных двигателей доля таких частиц может составлять до 50% и более. Таким образом, за счёт учета доли металла, находящейся в форме раствора и в форме частиц размером менее 2 мкм (примеси в растворённой форме), могут быть улучшены метрологические характеристики метода.

Для СВЧ-плазменных измерений сформулирован, так называемый, «принцип сцинтилляции». Он заключается в том, что вероятность одновременного нахождения нескольких металлических частиц в источнике возбуждения спектров (ИВС) должна быть минимальна. В этом случае возможна регистрация импульсов от каждой частицы в отдельности.

В реальных пробах размеры частиц распределены по логнормальному закону. Наиболее типичным является случай, когда в ИВС одновременно поступают несколько частиц, сигналы от них налагаются друг на друга. Как правило, это частицы размером менее 2 мкм. Уже в этом случае принцип сцинтилляции заведомо нарушается.

В предельном случае, металл находится в жидкой пробе в форме раствора и распределён в ней непрерывно. В этом случае каждая капля жидкой пробы, либо твёрдая частица при введении порошковой пробы может рассматриваться как отдельная частица или «порция», содержащая аналитический элемент. Если такие «порции» непрерывно и равномерно вводятся в ИВС, то их будет настолько много, что фактически сдвинется фоновый уровень сигнала. На этом фоне крупные (более условных 2 мкм) частицы металла будут давать отдельные импульсы.

В общем случае, аналитический сигнал будет формироваться большим количеством случайных во времени импульсов:

$$S(t) = \sum_{i=0}^{n_0 \rightarrow \infty} a_i(t) \quad (3.1)$$

где $a_i(t)$ — аналитический сигнал от каждой частицы, n_0 — число импульсов.

3.1 Формирование аналитического сигнала для непрерывно распределенной примеси

Рассмотрим случай непрерывной и равномерной подачи пробы, содержащей примесь в растворённой форме, т.е. в форме раствора или в форме большого числа частиц размером менее 2 мкм. Пусть распылитель генерирует в среднем N «порций» (капель или частиц) в единицу времени. Аналитический сигнал будет формироваться количеством подобных импульсов, обеспечивающим непрерывность сигнала. Время появления импульсов будет равномерно распределённой случайной величиной. Выражение для сигнала можно записать в виде следующего случайного процесса:

$$S_U(t) = \sum_{i=0}^{n_1 \rightarrow \infty} a_i \nu(t - t_i) \quad (3.2)$$

где a_i — амплитуда импульса (зависит от размеров «порции»), ν — форма импульса (одна для всех «порций»), t_j — время появления j -го импульса (пуассоновский процесс со средней скоростью отсчётов N).

Поскольку амплитуда каждого из импульсов в сущности является случайной величиной и происходит непрерывное наложение случайных величин (импульсов) друг на друга, то выражение (3.2) стремится к нормальному распределению с увеличением частоты импульсов. А значит, может быть приближено гауссовским процессом, характеристики которого:

$$M[S_U(t)] = NM[a] \int_{-\infty}^{\infty} \nu(t) dt \quad (3.3)$$

$$D[S_U(t)] = NM[a]^2 \int_{-\infty}^{\infty} \nu^2(t) dt - M[S_U(t)]^2 \quad (3.4)$$

где $M[S_U(t)]$ — среднее значение сигнала, $D[S_U(t)]$ — дисперсия, $M[a]$ — среднее значение амплитуды импульса.

В результате, среднее значение и дисперсия сигнала от непрерывно распределённой примеси не зависят от времени. Среднее значение и дисперсия сигнала пропорциональны значению N и среднему значению амплитуды импульса.

Поскольку гауссовский случайный процесс эргодичен, то с учетом (3.3)

$$\overline{S_U} = \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} S_U(t) dt = M[S_U(t)] \propto N \cdot \overline{m} \propto C_U \quad (3.5)$$

где $\overline{S_U}$ — среднее значение сигнала от непрерывно распределённой примеси за экспозицию, \overline{m} — средняя масса «порции», C_U — массовая доля непрерывно распределённой примеси.

3.2 Формирование аналитического сигнала для примеси в форме частиц

Рассмотрим теперь случай, когда вероятность одновременного нахождения более одной «порции» в источнике возбуждения спектров приближается к нулю. Выражение для импульсного сигнала будет иметь вид:

$$S_I(t) = \sum_{k=0}^{n_2} a_k \nu_k(t) = \sum_{k=0}^{n_2} I_k(t) \quad (3.6)$$

где n_2 — количество импульсов, $I_k(t)$ — импульс от k -ой частицы.

Среднее его значение за экспозицию пропорционально массовой доле металлической примеси в дискретных частицах крупных размеров C_D :

$$\overline{S_I} = \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} S_I(t) dt \propto C_D \quad (3.7)$$

В реальной практике будет наблюдаться случай, промежуточный между двумя описанными. Непрерывно распределённая примесь в растворённой

форме сформирует непрерывную часть сигнала, а частицы размером более 2 мкм сформируют импульсную часть сигнала. Общее выражение для сигнала в этом случае будет иметь вид:

$$S(t) = \sum_{i=0}^{n_1 \rightarrow \infty} a_i \mathbf{v}(t - t_i) + \sum_{k=0}^{n_2 \rightarrow \infty} I_k(t) + S_N(t) \quad (3.8)$$

Где первое слагаемое — выражение (3.2), второе — (3.6), а третье — шумовая составляющая, характеризуемая гауссовским процессом со своими характеристиками.

Выражение (3.8) может быть представлено в виде суммы двух типов случайных процессов, гауссовского и импульсного:

$$S(t) = S_G(t) + S_I(t) \quad (3.9)$$

Где S_G — гауссовский случайный процесс, S_I — импульсный случайный процесс.

Гауссовский случайный процесс формируется тремя составляющими: шумовым фоновым сигналом, сигналом от примеси в форме раствора и сигналом от частиц размером менее 2 мкм:

$$S_G(t) = S_N(t) + \sum_{i=1}^{(n_1^+ + n_1^-) \rightarrow \infty} a_i \mathbf{v}(t - t_i) \quad (3.10)$$

где n_1^+ — количество «порций» примеси в форме раствора, n_1^- — количество частиц размером менее 2 мкм.

Среднее значение этой части сигнала за экспозицию будет пропорционально сумме компонент гауссовского процесса:

$$\bar{S}_G = \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} S_G(t) dt \propto \bar{S}_N + C_s + C_p \quad (3.11)$$

где \bar{S}_N — средняя амплитуда шумовой составляющей, C_s — содержание примеси в форме раствора, C_p — содержание примеси в форме частиц размером менее 2 мкм.

При известной амплитуде шумовой составляющей она может быть вычтена из среднего значения сигнала, сформированного гауссовским процессом.

Компоненты сигнала, соответствующие C_s и C_p имеют схожую форму и амплитуду. Со снижением скорости подачи пробы, частота сигналов для обоих компонент будет снижаться одновременно.

В рамках текущей постановки задачи, разделить эти составляющие не удастся и следует выделять обе составляющие совокупно, как содержание примеси в растворённой форме.

Производительность распыления (количество «порций» в единицу времени N), а также амплитуда фонового сигнала, в общем случае, могут меняться со временем. Причинами тому могут служить флуктуации источника возбуждения спектров или работы распылителя.

В целях снижения погрешности СВЧ-плазменных измерений массовой доли элемента, эти характеристики должны оставаться постоянными во время экспозиции.

3.3 Способ отдельного выделения непрерывного и импульсного сигналов при СВЧ-плазменных измерениях

Из изложенного выше материала видно, что аналитический сигнал в общем виде будет представлять сумму двух случайных сигналов:

1. Непрерывного сигнала, характеризуемого малой амплитудой шума, медленным и плавным изменением среднего значения со временем. Пропорционален содержанию элемента в виде раствора и частиц менее 2 мкм;

2. Импульсного сигнала, порождающего отдельные импульсы с амплитудой, больше амплитуды непрерывного сигнала. Пропорционален содержанию элемента в крупных частицах.

В качестве иллюстрации на рис. 3.1 приведены импульсные сигналы (зависимость интенсивности сигнала от времени), налагающиеся на непрерывный, медленно меняющийся сигнал (а).

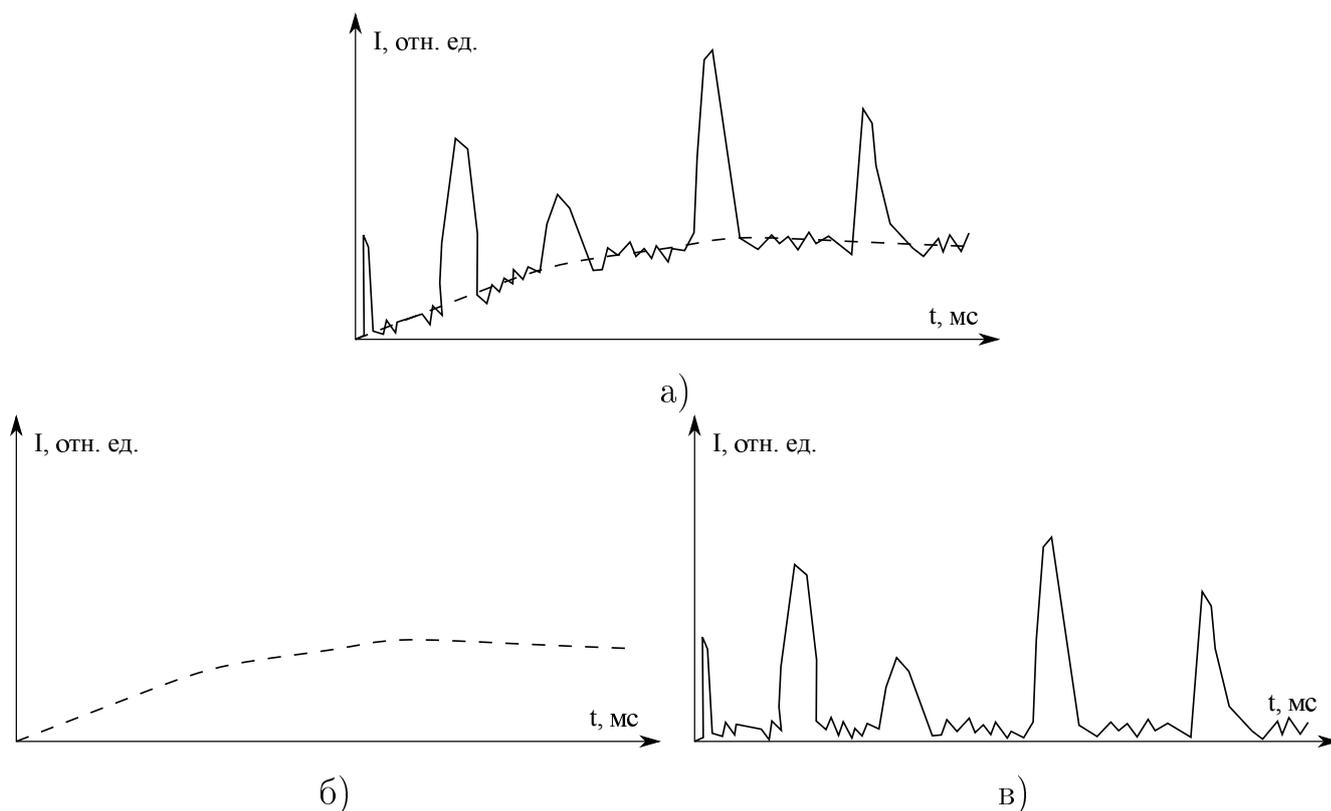
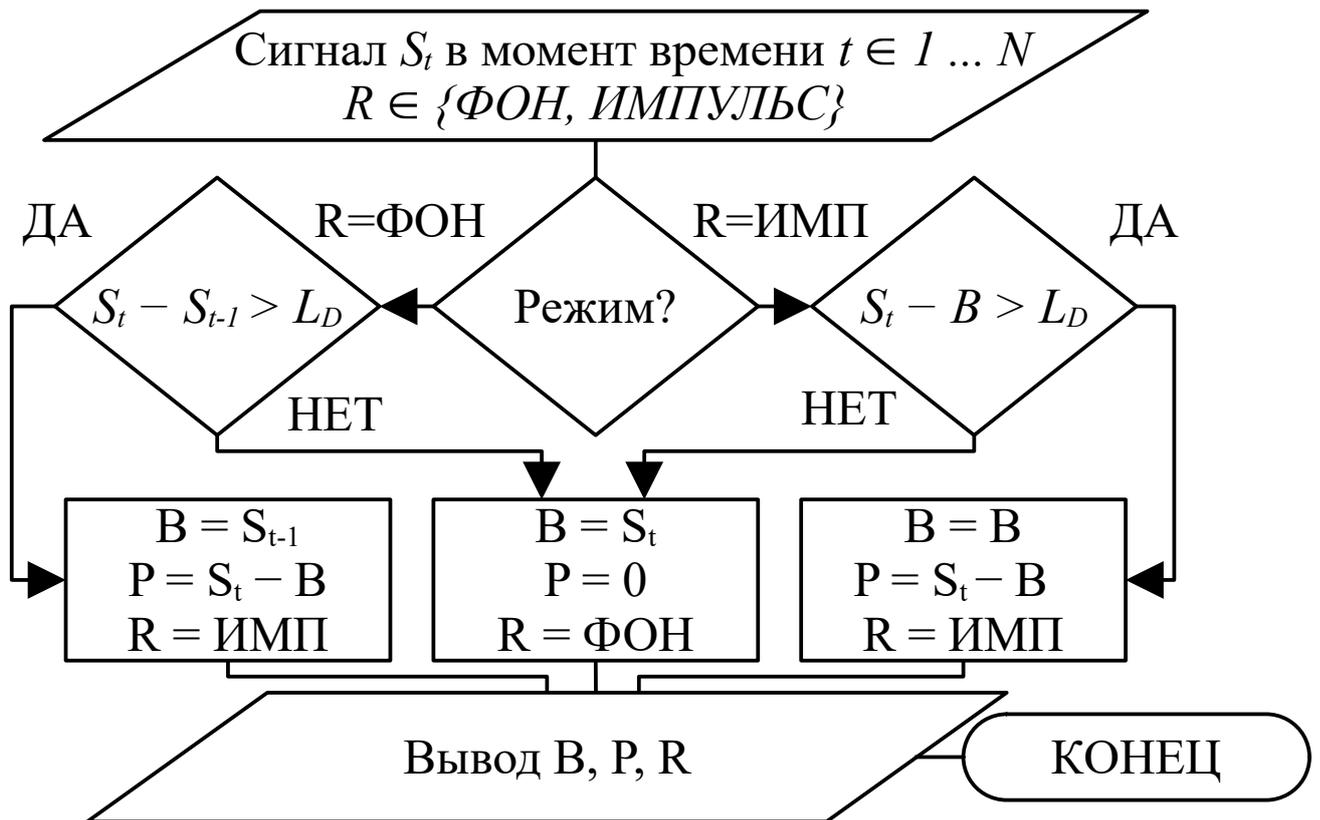


Рисунок 3.1 — Иллюстрация налагающихся фоновых и импульсных сигналов

В результате разделения на две составляющих сигнала, должна получиться картина, представленная на рис. 3.1 (б, в). Наиболее простым способом практической реализации разделения сигналов является программный. Это выполнено при помощи алгоритма «динамической дискриминации», блок-схема которого приведена на рисунке 3.2.

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».



Обозначения: $S(t_n)$ – уровень сигнала в моменты времени t_n , B – фоновый сигнал, I – импульсный сигнал, M – граница фонового сигнала, L_D – «уровень дискриминации»

Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма «динамической дискриминации»

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 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.

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 [100] до единиц мс [74].

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. Такие ситуации можно выявить посредством дискриминации импульсов по длительности.

Программная реализация указанного подхода позволила получить для выделенных сигналов картину, представленную на 3.1 (б, в).

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.

3.4 Экспериментальное подтверждение разработанного способа выделения сигнала

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 5.

Таблица 5 — 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

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.

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

Согласно таблице 5 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.

Полученные результаты свидетельствует в пользу того, что указанный подход к регистрации сигналов при СВЧ-плазменных измерениях массовой

доли позволяет производить анализ проб независимо от формы нахождения элемента.

Разработанное программное обеспечение для выделения сигналов стало частью программного комплекса управления спектрометром «Регистрация». СВЧ-плазменный анализатор зарегистрирован в госреестре СИ под номером № 64278-16 [76]. Методика измерений массовой доли в форме растворённой примеси аттестована для магния, железа, меди.

3.5 Выводы по главе

1. Показано, что СВЧ-плазменный сигнал содержит импульсную и непрерывную составляющую. Первая формируется при сгорании крупных (более 2 мкм диаметром) частиц металлической примеси. Вторая состоит из фонового сигнала, частиц размером менее 2 мкм и примеси в форме раствора;
2. Разработан алгоритм и программная реализация отдельного выделения непрерывного и импульсного сигналов при СВЧ-плазменных измерениях.
Отдельное измерение содержания элемента в растворённом виде позволяет определить наличие повреждения узлов трения двигателя в случаях, когда повреждение сопровождается выделением в масло повышенного количества частиц износа размером менее 2 мкм. Возможность учёта этих случаев повышает достоверность диагностирования;
3. 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.

Глава 4. Автоматизация принятия диагностического решения по результатам СВЧ-плазменных измерений

При наличии формального алгоритма принятия диагностического решения, его автоматизация становится достаточно простой технической задачей. Однако, до сих пор, этому вопросу не уделялось должного внимания. Заключение о техническом состоянии двигателя формировалось экспертным методом на основе сравнения измеренных параметров с соответствующими параметрами статистической модели исправного двигателя.

Для анализа возможности создания диагностического алгоритма имеются данные СВЧ-плазменного анализа двигателей Д30КП/КП-2 за период 2000-2019 г. В данных содержатся как двигатели после проведения приемо-сдаточных испытаний, с наработкой до 15 ч., так и находящиеся в эксплуатации, с диапазоном наработок от 15 до 5000 ч. Среди последних, имеются как пробы двигателей, отбор и анализ которых производился периодически через 50 часов, начиная с малой наработки, так и пробы, отбор которых производился при возникновении сигналов от штатных систем диагностики [70].

Распределение проб по техническому состоянию двигателей приведено в таблице 6.

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); подшипников 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.

Таблица 6 — Распределение проб по техническому состоянию двигателей

№	Состояние двигателя	Кол-во проб
1	в норме	532
2	особый контроль	292
3	повреждение роликоподшипника 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

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. Границей превышения может считаться значение как на два, так и на три стандартных отклонения выше среднего значения. Набор параметров, для которых учитываются превышения, 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 повреждённого узла при этом оказывается корректной.

4.1 Методы машинного обучения

Подходить к созданию системы принятия диагностического решения можно различными способами. Одним из часто применяющихся способов является создание экспертной системы на основе нечеткой логики [103–106]. Задается некая целевая переменная y (в контексте диагностирования — обозначающая техническое состояние двигателя), значение которой нужно определить по набору переменных, характеризующих состояние двигателя x (диагностических признаков). Далее подбирается функция $y = f(x)$ в виде некоторого набора преобразований над x . В частности, может быть построен граф, связывающий x с промежуточными значениями z , а затем и с y . Промежуточные значения z вычисляются как линейные функции от x или других промежуточных значений с коэффициентами (весами) w . Веса w затем подбираются таким образом, чтобы выходное значение y имело требуемый смысл (соответствовало техническому состоянию). В случае, когда входных признаков x немного и они имеют явно прослеживаемую связь с y , это является достаточно простой задачей. В других случаях, в силу большого количества промежуточных значений z , получается архитектура графа, чрезвычайно сложная для построения и подбора весов.

При использовании машинного обучения [107] вид функции $y = f(x)$ подбирается в соответствии с архитектурой того или иного алгоритма обучения на основе имеющихся данных, состоящих из отдельных наблюдений (проб двигателей). Наблюдения при этом в отдельных случаях могут состоять из огромного количества признаков — десятков тысяч и более. Так как не существует единственного алгоритма обучения, подходящего для любой задачи [108], должен быть осуществлен подбор алгоритма. Задача диагностирования может решаться с применением метода k -ближайших соседей [109; 110], нейросетей различных архитектур [111–113], алгоритмов «случайного леса» [114–117]. Ограничения того или иного алгоритма связаны

со спектром преобразований над исходными данными, который различается для каждого алгоритма и набора данных и который требуется совершить для получения достоверного результата, а также с наличием связи между набором признаков x и целевой переменной y .

В случае, когда целевая переменная является собой некую метку (класс), связанную с набором диагностических признаков, задача её определения называется классификацией, а соответствующий алгоритм — классификатором. Примером классификации может служить идентификация объекта по фотографии (светофор, машина и т. д.). В диагностике это может быть классификация состояний двигателя — «исправен», «не исправен».

Для контроля соответствия входных данных целевой переменной вводится функционал качества. Для задачи диагностики функционалом качества может являться достоверность диагностирования, процент ошибки I-го и II-го рода и т. д. В работе функционалом качества является «точность» — доля верно определенных классов от общего количества.

4.2 Построение базового классификатора состояний

В качестве классов были выбраны состояния «в норме», «особый контроль», «повреждён». Пробы класса «особый контроль», для которых не обнаружено превышения граничных значений признаков 1 или 2 группы (20 проб), были переведены в класс «в норме».

Простой вероятностный классификатор можно использовать как ориентир для результата обучения. Пробы «в норме», «особый контроль», «повреждён» представлены по количеству в соотношении 60 : 32 : 8. Вероятностный классификатор, по определению, будет выдавать в качестве результата «в норме», «особый контроль», «повреждён» в 60%, 32% и 8%

случаев, соответственно. Матрица ошибок (confusion matrix) такого классификатора представлена в таблице 7.

Таблица 7 — Матрица ошибок классификации вероятностной модели

Эксперт \ Модель	В норме	Особый контроль	Повреждён	Всего проб
В норме	60%	32%	8%	532
Особый контроль	60%	32%	8%	292
Повреждён	60%	32%	8%	70

В каждой ячейке таблицы 7 приведена доля классов из строки, определенная обученной моделью как метка в столбце. Для этого классификатора, 60% проб повреждённых двигателей будут определены как «норма», и 8% проб исправных двигателей будут определены, как «повреждён».

В данной работе наибольшее использование получил алгоритм «случайного леса» [117]. Алгоритм оказался привлекателен в ходе испытания различных алгоритмов при построении первоначальных моделей (классификаторов). Он показал высокую скорость обучения при неизменности результата классификации по сравнению нейросетями простой и рекуррентной архитектуры, SVM и другими алгоритмами. Для многих обучающих алгоритмов, особенно при большом количестве признаков, характерна проблема, когда происходит «запоминание» набора входных данных, и обученный алгоритм показывает резко уменьшенный результат при работе с аналогичными данными, не использованными для обучения. Эта проблема называется переобучением (переподгонкой, overfitting). Алгоритм «случайного леса» гарантирует защиту от переобучения даже в случае, когда количество признаков значительно превышает количество наблюдений, что выделяет алгоритм среди множества других методов классификации и является чрезвычайно ценным для решения многих прикладных задач [117].

Алгоритм строит ансамбль решающих деревьев, каждое из которых использует случайную подвыборку наблюдений и случайный набор признаков. При обучении, на каждом узле дерева по заранее определенному критерию

выбирается признак и его граничное значение, по которым осуществляется разбиение наблюдений таким образом, чтобы различные классы оказывались на различных новых узлах. В качестве такого критерия обычно используется индекс (смешивание) Джини, выражающий неравномерность присутствия классов для различных значений признака. Это продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто заданное максимальное количество разбиений, либо на узле не останутся наблюдения только одного класса. Затем, при классификации отдельного наблюдения обученным алгоритмом, осуществляется проход по дереву с проверкой признаков наблюдения и соответствующих граничных значений, в результате которого выбирается отдельный лист дерева с соответствующим классом. Значение целевой переменной определяется путем голосования ансамбля.

Известно, что в случае, когда классы не сбалансированы (вероятности присутствия каждого класса в пробе не равны друг другу, см. табл. 7), может наблюдаться явление, когда редкие классы будут «задавлены» преобладающими, вплоть до того, что не будут классифицироваться вовсе. Причины этого явления можно понять в следующем примере. Допустим, в выборке имеется 98 и 2 наблюдения для первого и второго классов, и имеется результат классификации, заключающийся в том, что 90/96 и 0/2 от наблюдений преобладающего и редкого классов определены корректно, т.е. «точность» классификации составляет 93.75% и 0%. Допустим теперь, что выборка организована таким образом, что для увеличения «точности» классификации с 0% до 50% для редкого класса требуется изменить граничные значения для критериев разбиения таким образом, что «точность» классификации преобладающего класса упадет до 87.5%. Суммарная «точность» по всем классам при этом упадет с 93.9% до 87.8%. Если последняя используется в качестве функционала качества обучения, то второй результат будет менее предпочтительным для алгоритма. Поэтому, при работе с несбалансированными классами, выбирается функционал качества, учитывающий это обстоятельство. Аналогичное явление наблюдается при

упомянутом голосовании «случайного леса». В этом случае, голоса классов подсчитываются с весовыми коэффициентами.

В работе, классификатор «случайного леса» строился на основе «параметров фильтра» — рейтингов простых и сложных частиц, среднего размера частиц и «коэффициентов износа» — $V_{\text{общ}}$ и $V_{\text{элемент}}$. Описание этих признаков было дано в главе 1. Для простоты, при построении модели классификации были исключены параметры, имеющие в элементном составе более 3 элементов. Всего модель использовала 102 параметра.

Для перекрестной проверки (проверочной и обучающей выборки) использовалось по половине от каждого класса. Пробы класса «повреждён», по которым имеется малое число проб (ЗКП, МВП, КВД, см. табл 6) не помещались в тренировочную выборку, но помещались в проверочную.

При обучении этой и дальнейших моделей использовались следующие параметры обучающей функции («гиперпараметры»), подобранные перебором:

1. Количество деревьев = 100;
2. Максимальная глубина расщепления = 7;
3. Максимальное количество признаков = 30;
4. Максимальное количество листьев = 12;
5. Критерий разбиения = индекс Джини;
6. Веса классов = сбалансированные — количество голосов за класс умножается на величину, обратную вероятности присутствия класса в выборке (сумма весов нормируется на единицу).

Матрица ошибок классификации полученной модели приведена в таблице 8.

Таблица 8 — Усредненная матрица ошибок классификации модели параметров фильтра

Эксперт \ Модель	Норма	Особый контроль	Повреждён	Всего проб
Норма	(77±6)%	(22±7)%	(1±1)%	266
Особый контроль	(34±9)%	(61±9)%	(5±4)%	146
Повреждён	(11±8)%	(53±14)%	(37±14)%	39

При построении матрицы ошибок использовался усредненный результат сотни моделей. Разбиение на проверочную и обучающую выборки происходило при построении каждой модели. Символом (\pm) обозначен доверительный интервал ($\alpha = 0.95$).

Полученная модель работает гораздо лучше вероятностной. Так, согласно таблице 8, для классов «в норме», «особый контроль», «повреждён», состояние соответственно в 77%, 61% и 37% случаев достоверно определяется разработанным алгоритмом. В 11% случаев повреждение не обнаруживается алгоритмом, хотя может быть определено и локализовано экспертом. В 1% случаев исправный двигатель определяется как имеющий повреждения.

4.3 Совершенствование классификатора состояний

Для оценки эффективности отдельных параметров случайного леса может использоваться «важность» — процент использования параметра при построении узла отдельного дерева. При дальнейшем анализе, «важности» параметров, рассчитанные алгоритмом для отдельных классификаторов, усреднялись.

Исключение параметров с низкой «важностью» может увеличить точность классификации. Исключение трети параметров («важностью» 0.5% и менее) практически не изменяло результат. Дальнейшее постепенное исключение параметров вплоть до оставшихся четырех увеличивало точность определения класса «повреждён» за счет классов «в норме», «особый контроль». Указанные четыре параметра это «коэффициент износа» по меди, рейтинг простых частиц алюминия, общий рейтинг никеля и рейтинг сложных частиц железо-серебро (исходные «важности» 7%, 5%, 4.8% и 4.2% соответственно). Матрица ошибок полученной модели приведена в таблице 9.

Таблица 9 — Матрица ошибок модели пробы фильтра с исключенными параметрами

Эксперт \ Модель	Норма	Особый контроль	Повреждён	Всего проб
Норма	(70±9)%	(27±9)%	(3±3)%	266
Особый контроль	(39±11)%	(50±11)%	(11±7)%	146
Повреждён	(11±9)%	(41±16)%	(49±16)%	39

На рисунке 4.1 представлены распределения используемых моделью параметров — коэффициента износа по меди $V_{\text{эле.}}(\text{Cu})$, рейтинга простых частиц алюминия $R_{\text{пр.}}(\text{Al})$, общего рейтинга никеля $R_{\text{общ.}}(\text{Ni})$, рейтинга сложных частиц железо-серебро $R_{\text{сл.}}(\text{Fe} - \text{Ag})$. Точками обозначено количество

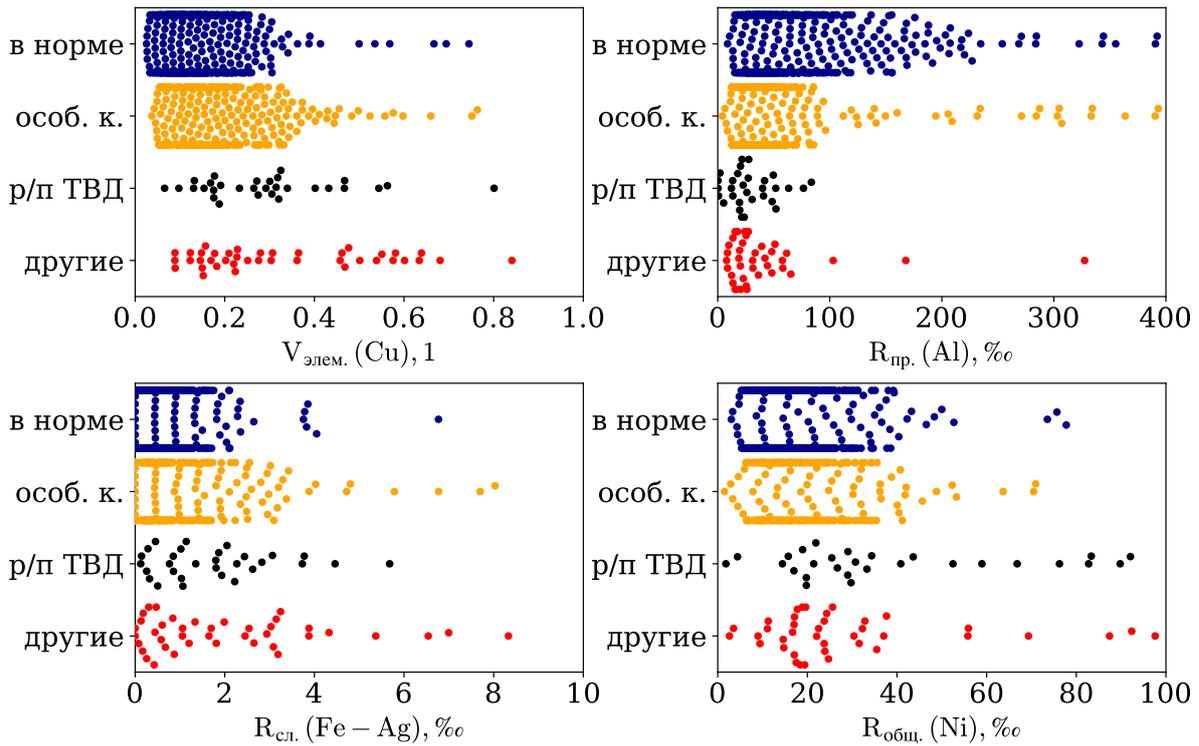


Рисунок 4.1 — Распределения параметров модели с исключенными параметрами

проб, имеющих заданное значение параметра по состояниям, сверху вниз — «в норме», «особый контроль», «повреждение р/п ТВД», «другой тип повреждения». Для коэффициента износа по меди, общего рейтинга никеля и

рейтинга сложных частиц железо-серебро «ухудшение» технического состояния происходит с увеличением параметра. Для рейтинга простых частиц алюминия справедливо обратное. Также, рисунок дает представление об уровне смешения классов, препятствующего точной классификации.

Полученная модель сходна по результатам с исходной, однако гораздо более проста. Это свидетельствует о том, что алгоритм не обнаружил какие-либо закономерности для исходной модели, связывающие элементный состав с целевой переменной — используется только анализ отношений сложных частиц.

Далее была построена модель, использующая «параметры масла» — количество частиц, массовая доля элемента форме растворённой примеси, в форме частиц средний размер частиц, в общей сложности 112 параметров. Матрица ошибок приведена в таблице 10.

Таблица 10 — Матрица ошибок модели пробы масла

Эксперт \ Модель	Норма	Особый контроль	Повреждён	Всего проб
Норма	(74±9)%	(25±9)%	(2±2)%	266
Особый контроль	(42±12)%	(51±11)%	(7±6)%	146
Повреждён	(13±11)%	(40±16)%	(47±15)%	39

Неожиданно, результат оказывается аналогичным модели, использующей параметры фильтра. В процессе исключения параметров также наблюдается аналогичная тенденция повышения точности определения класса «повреждён». Однако, при изменении процента исключения с 75% до 90% (остается 11 параметров) часть класса «повреждён», определявшаяся как «особый контроль», переходит в класс «норма» (см. табл. 11).

Следовательно, такая модель оказывается менее устойчивой по сравнению с моделью по параметрам фильтра.

Перебор «гиперпараметров» для упрощенных моделей не позволил улучшить качество классификации. Поэтому дальнейшее улучшение

Таблица 11 — Матрица ошибок модели пробы масла с исключенными параметрами

Эксперт \ Модель	Норма	Особый контроль	Повреждён	Всего проб
Норма	(74±9)%	(24±8)%	(3±3)%	266
Особый контроль	(43±11)%	(46±11)%	(10±6)%	146
Повреждён	(18±10)%	(31±17)%	(50±17)%	39

целесообразно искать за счет конструирования признаков. Проверять качество признаков будем, добавляя их к модели на параметрах фильтра.

Сначала был сконструирован признак $R_{\text{сл.}}^{(i)}$ — рейтинг сложных частиц по элементу i , представляющий собой разность $R_{\text{общ.}}^{(i)}$ — общего рейтинга по элементу i и рейтинга простых частиц по элементу i — $R_{\text{пр.}}^{(i)}$. Модель, построенная на этих признаках, в целом повторяет результаты таблицы 9.

В ходе конструирования признаков естественно отметить, что экспертом в первую очередь уделяется внимание параметрам, для которых обнаружено превышение граничных значений в 2 или 3 стандартных отклонения (произошёл статистический «выброс»).

Разделим исходные параметры на группы одно- и многоэлементных:

1. Одноэлементные параметры — общие рейтинги, рейтинги «простых» частиц, средний размер частиц, «коэффициенты износа», массовая доля элемента в частицах, массовая доля элемента в форме растворённой примеси;
2. Многоэлементные параметры — рейтинги частиц из нескольких элементов.

«Выбросами» будем считать значения параметров сверх 95-перцентиля, рассчитанного по выборке исправных двигателей с наработкой более 500 часов. Количество «выбросов» в группе 1, 2 отдельно возьмем в качестве двух новых признаков — $O_{95}^{(1)}$, $O_{95}^{(2)}$. Аналогично, введем такие же признаки, используя в качестве границы «выброса» 99-перцентиль параметра — $O_{99}^{(1)}$, $O_{99}^{(2)}$. Такой

подход позволяет не учитывать закон распределения отдельных параметров при расчете граничных значений.

Построим модель, содержащую 12 признаков — 8 сконструированных ранее рейтингов сложных частиц по элементу $R_{сл.}^{(i)}$, а также 4 признака по количеству «выбросов». Это дает следующий результат (см. табл. 12):

Таблица 12 — Матрица ошибок модели с использованием количества «выбросов»

Эксперт \ Модель	В норме	Особый контроль	Повреждён	Всего проб
Норма	(68±7)%	(28±7)%	(4±2)%	266
Особый контроль	(25±8)%	(64±9)%	(11±6)%	146
Повреждён	(5±6)%	(31±16)%	(64±17)%	39

По сравнению с предыдущими моделями увеличена точность определения класса «повреждён» и снижен процент ошибки для остальных классов.

Подводя итоги. Разработанный классификатор позволяет определить классы «в норме», «особый контроль», «повреждён». При этом в 68%, 64% и 64% случаев результат классификации совпадает с результатом экспертной оценки.

При уровне износа, когда поврежденный узел может быть локализован экспертом, повреждение не обнаруживается всего в 5% случаев. И в 4% случаев происходит обратная ситуация — для проб «в норме» присваивается класс «повреждён». Это может происходить потому, что статистическая модель исправного двигателя со временем корректировалась. Как следствие, сдвигались интервалы параметров, по которым определялось состояние «особый контроль» и «повреждён». Повторная экспертная оценка при этом не производилась. Об этом свидетельствует наличие в выборке проб «особый контроль», «повреждён», для которых не происходит превышения границы 95-перцентиля. Это также является одной из причин сравнительно небольшой точности определения класса «особый контроль» в 64%.

Вследствие того, что процент некорректной классификации сравнительно невысок для указанных случаев (4% и 5%), классификатор

может использоваться в качестве способа для автоматизированного определения технического состояния узлов трения двигателей Д30КП/КП-2. Результат может быть улучшен как посредством снижения погрешности СВЧ-плазменного метода, так проведением переобучения алгоритма после ревизии экспертной оценки.

4.4 Выводы по главе

– Предложен тип диагностического признака — рейтинг сложных частиц $R_{\text{сл.}}^{(i)}$, содержащих элемент i , где $i \in \{Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V\}$ (всего 8 признаков);

– Предложены диагностические признаки — $O_{95}^{(1)}$, $O_{95}^{(2)}$, $O_{99}^{(1)}$, $O_{99}^{(2)}$, представляющие собой количество превышений 95-, 99-перцентиля среди группы «одноэлементных» параметров 1, включающей рейтинги «простых» частиц, средний размер частиц, «коэффициенты износа», содержание элемента в виде частиц; а также среди группы 2, включающей рейтинги «сложных» частиц из 3 элементов или менее;

– С использованием 12 новых признаков разработан классификатор состояния узлов трения маслосистемы двигателей Д30КП/КП-2, построенный на основе алгоритма «случайного леса». В качестве классов используются состояния «в норме», «особый контроль», «повреждён». Результаты классификации совпадают с экспертным методом в 68%, 64% и 64% случаев, соответственно;

– Разработанный алгоритм можно использовать в качестве оценочного способа автоматизированного определения технического состояния узлов трения маслосистемы двигателей Д30КП/КП-2.

Основные результаты и выводы

1. Проведен анализ использующихся 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 Д30КП/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.

Список литературы

1. Анализ влияния надежности на безопасность полетов по типу ВС / ГосЦентр безопасности полетов. – М. : М., 2009. – 148 с.
2. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review / H. Wei, C. Wenjian, W. Shaoping, M. M. Tomovic // Chinese Journal of Aeronautics. – 2018. – Vol. 31, no. 5. – P. 867–882.
3. Анализ съёмов двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 за период 2000-2004 гг. по неисправностям узлов, омываемых смазочным маслом : тех. справка № 44-596168 / ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2005. – 32 с.
4. Patent no. 6151108 USA. On-line measurement of contaminant level in lubricating oil : № 09/386168 : Publ. 21.11.2000 / O. K. Kwon, H. S.Kong, H. G. Han.
5. Hunt, T. M. Handbook of wear debris analysis and particle detection in liquids / T. M. Hunt. – Luxembourg : Springer Dordrecht, 1993. – 488 p. – ISBN 978-1-85166-962-2.
6. Kuo, W.-F. Fundamental characteristics of wear particle deposition measurement by an improved on-line ferrographic analyzer / W.-F. Kuo, Y.-C. Chiou, R.-T. Lee // Wear. – 1997. – Vol. 208, no. 1/2. – P. 42–49.
7. A new on-line visual ferrograph / T. Wu, J. Mao, J. Wang, [et al.] // Tribology transactions. – 2009. – Vol. 52, no. 5. – P. 623–631.
8. Description of wear debris from on-line ferrograph images by their statistical color / T. Wu, J. Wang, Y. Peng, Y. Zhang // Tribology Transactions. – 2012. – Vol. 55, no. 5. – P. 606–614.
9. Advances in research on a multi-channel on-line ferrograph / L. Yan, W. ShiZhu, X. YouBai, Z. Fang // Tribology international. – 1997. – Vol. 30, no. 4. – P. 279–282.

10. LASERNET FINES optical oil debris monitor : tech. rep. / J. Tucker, J. Reintjes, M. Duncan, [et al.] ; Naval Research Laboratory. – Washington, USA, 1998. – 8 p.
11. Rheims, J. Sizing of inhomogeneous particles by a differential laser Doppler anemometer / J. Rheims, T. Wriedt, K. Bauckhage // Measurement Science and Technology. – 1999. – Vol. 10, no. 2. – P. 68.
12. Du, L. An integrated ultrasonic–inductive pulse sensor for wear debris detection / L. Du, J. Zhe // Smart Materials and Structures. – 2012. – Vol. 22, no. 2. – P. 025003.
13. Ultrasonic echo waveshape features extraction based on QPSO-matching pursuit for online wear debris discrimination / C. Xu, P. Zhang, H. Wang, [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – Amsterdam, 2015. – Vol. 60. – P. 301–315.
14. Nemarich, C. P. On-line wear particle monitoring based on ultrasonic detection and discrimination : tech. rep. / C. P. Nemarich, H. K. Whitesel, A. Sarkady ; David Taylor Research Center. – Bethesda, USA, 1988. – 18 p.
15. Oil debris detection using capacitance and ultrasonic measurements / J. Zhe, F. Choy, S. Murali, [et al.] // 2007 Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, IJTC 2007 / ASME, STLE. – San Diego, USA, 2007. – Vol. 48108. – P. 113–115.
16. Patent no. 4015464 USA. Ultrasonic continuous wave particle monitor : № 05/551913 : Publ. 1977-04-05 / J. G. Miller, R. E. Clark, M. S. Conradi [et al.]
17. Edmonds, J. Detection of precursor wear debris in lubrication systems / J. Edmonds, M. S. Resner, K. Shkarlet // 2000 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 00TH8484) / IEEE. – Big Sky, USA, 2000. – Vol. 6. – P. 73–77.

18. Harries, C. Research into an on-line device for monitoring contamination in fluids using ultrasonic techniques : tech. rep. / C. Harries, R. Sayles, P. MacPherson ; Imperial Coll. of Science and Technology. – London, 1984. – 107 p.
19. Powrie, H. Gas path condition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine / H. Powrie, K. McNicholas // 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit / AIAA [et al.] – Seattle, USA, 1997. – P. 2904.
20. Nurse, J. Engine gas path integrity monitoring / J. Nurse, C. Petch, C. Fisher // Aerotech 94 / Institution of Mechanical Engineers. – London, UK, 1994. – paper C470/6/052.
21. Powrie, H. Monitoring of foreign objects ingested into the intake of a gas turbine aero-engine / H. Powrie, C. Fisher // International Conference on Condition Monitoring / University of Swansea. – Swansea, 1999. – P. 175–190.
22. Use of electrostatic charge monitoring for early detection of adhesive wear in oil lubricated contacts / S. Morris, R. Wood, T. Harvey, H. Powrie // Journal of tribology. – 2002. – Vol. 124, no. 2. – P. 288–296.
23. Tasbaz, O. Electrostatic Monitoring of Oil lubricated contacts for early detection of wear / O. Tasbaz, H. Powrie, R. Wood // International Conference on Condition Monitoring / University of Swansea. – Swansea, 1999. – P. 12–15.
24. Wood, R. Electrostatic charging precursor to scuffing in lubricated contacts / R. Wood, M. Browne, M. Thew // Proceedings of 1st World Tribology Congress / ASME [et al.] – London, UK, 1997. – P. 102.
25. Electrostatic monitoring of boundary and mixed lubrication / T. Harvey, S. Morris, H. Powrie, R. Wood // Tribology Series. – 2002. – Vol. 40. – P. 83–92.

26. Performance of an electrostatic oil monitoring system during an FZG gear scuffing test / H. Powrie, C. Fisher, O. Tasbaz, R. Wood // International Conference on Condition Monitoring / University of Swansea. – Swansea, UK, 1999. – P. 145–155.
27. Re-analysis of electrostatic wear-site sensor data from FZG gear scuffing tests / H. Powrie, R. Wood, T. Harvey, S. Morris // Condition Monitor. – 2001. – Vol. 177. – P. 6–12.
28. Powrie, H. Engine health monitoring: towards total prognostics / H. Powrie, C. Fisher // 1999 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No. 99TH8403) / IEEE. – Snowmass, USA, 1999. – Vol. 3. – P. 11–20.
29. Powrie, H. Use of electrostatic technology for aero engine oil system monitoring / H. Powrie // 2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No. 00TH8484) / IEEE. – Big Sky, USA, 2000. – Vol. 6. – P. 57–72.
30. Electrostatic charge generation associated with machinery component deterioration / H. Powrie, R. Wood, T. Harvey, [et al.] // Proceedings, IEEE Aerospace Conference : conf. proc. (2002) / IEEE. – Big Sky, USA, 2002. – Vol. 6. – P. 6.
31. Harvey, T. Electrostatic wear monitoring of rolling element bearings / T. Harvey, R. Wood, H. Powrie // Wear. – 2007. – Vol. 263, no. 7–12. – P. 1492–1501.
32. Simulation of Electrostatic Oil Line Sensing and validation using experimental results / R. Liu, H. Zuo, J. Sun, L. Wang // Tribology International. – 2017. – Vol. 105. – P. 15–26.
33. Capacitive Coulter counting: detection of metal wear particles in lubricant using a microfluidic device / S. Murali, X. Xia, A. V. Jagtiani, [et al.] // Smart Materials and Structures. – 2009. – Vol. 18, no. 3. – P. 037001.
34. Miller, J. L. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment / J. L. Miller, D. Kitaljevich // 2000 IEEE Aerospace Conference.

- Proceedings (Cat. No.00TH8484) / IEEE. – Big Sky, USA, 2000. – Vol. 6. – P. 49–56.
35. MetalSCAN MS4000 ONLINE OIL DEBRIS MONITORING SYSTEM : online specification sheet / Gastops. – 2018. – URL: <https://www.gastops.com/wp-content/uploads/MS4000-Product-Overview.pdf> (date accessed: 05/13/2022).
 36. Centers, P. W. Real time simultaneous in-line wear and lubricant condition monitoring / P. W. Centers, F. D. Price // Wear. – 1988. – Vol. 123, no. 3. – P. 303–312.
 37. Electronic Oil Debris Monitoring System : tech. rep. / Eaton Aerospace Group. – Glenolden, USA, 2009. – 19 p.
 38. Harkemanne, E. Analysis and Testing of Debris Monitoring Sensors for Aircraft Lubrication Systems / E. Harkemanne, O. Berten, P. Hendrick // Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings. – 2018. – Vol. 2. – P. 461.
 39. Зарицкий, С. Сравнительный анализ характеристик датчиков систем контроля содержания частиц износа в масле / С. Зарицкий, В. Степанов, И. Тулупов // Первая междунар. конф. «Энергодиагностика»: сб. трудов / Российское АО "Газпром"[и др.] – Москва, 1995. – Т. 3. – С. 293–306.
 40. Du, L. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring / L. Du, J. Zhe // Tribology International. – 2011. – Vol. 44, no. 2. – P. 175–179.
 41. Improving sensitivity of an inductive pulse sensor for detection of metallic wear debris in lubricants using parallel LC resonance method / L. Du, X. Zhu, Y. Han, [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2013. – Vol. 24, no. 7. – P. 075106.

42. A new debris sensor based on dual excitation sources for online debris monitoring / W. Hong, S. Wang, M. M. Tomovic, [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2015. – Vol. 26, no. 9. – P. 095101.
43. Халлиулин, В. MetalScan в действии / В. Халлиулин, Ф. Мухутдинов // Пермские авиационные двигатели. – 2014. – № 29. – С. 48–49.
44. Халлиулин, В. Маслосистема под непрерывным контролем / В. Халлиулин // Пермские газовые турбины. – 2012. – № 22. – С. 46.
45. Отчет по анализу эффективности применения системы MetalSCAN при испытаниях двигателей ПД-14 : тех. отч. / АО «ОДК-Авиадвигатель». – Пермь, 2014. – 79 с.
46. Seifert, W. A method for the study of wear particles in lubricating oil / W. Seifert, V. Westcott // Wear. – 1972. – Vol. 21, no. 1. – P. 27–42.
47. Yarrow, A. The role of ferrography in the monitoring of helicopter assemblies / A. Yarrow, P. Gadd // Condition Monitoring 84 / University College of Swansea. – Swansea, UK : Pineridge Press Ltd, 1984. – P. 503–524.
48. Wear particles: from the cradle to the grave / D. Dowson, G. Dalmaz, T. Childs, [et al.]. – Amsterdam : Elsevier, 1992. – 546 p. – ISBN 978-0-08087-585-9.
49. Anderson, D. P. Wear particle atlas (Revised) : Final Technical Report / D. P. Anderson ; Naval Air Engineering Center. – 1982. – 185 p.
50. Roylance, B. The morphological attributes of wear particles—their role in identifying wear mechanisms / B. Roylance, S. Raadnui // Wear. – 1994. – Vol. 175, no. 1/2. – P. 115–121.
51. Spectrometric oil analysis. Detecting engine failures before they occur / K. J. Eisentraut, R. W. Newman, C. S. Saba, [et al.] // Analytical Chemistry. – 1984. – Vol. 56, no. 9. – P. 1086–1094.
52. Делли, Р. Д. Обзор феррографии и её применение при техническом обслуживании / Р. Д. Делли // Первая междунар. конф.

- «Энергодиагностика»: сб. трудов / Российское АО "Газпром"[и др.] – Москва, 1995. – Т. 3. – С. 120–152.
53. Джонс, М. Решение проблемы анализов больших частиц износа / М. Джонс, А. Массуди // Первая междунар. конф. «Энергодиагностика»: сб. трудов / Российское АО "Газпром"[и др.] – Москва, 1995. – Т. 1. – С. 84–102.
54. Степанов В. А. Разработка и исследование методов и средств комплексной диагностики смазываемых узлов трения газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле : специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки», 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Степанов; ГНЦ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова». – М., 2000. – 40 с.
55. Степанов, В. Диагностика технического состояния узлов трансмиссии газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле / В. Степанов. – Рыбинск : НПО Сатурн. Науч.-техн. совет, 2002. – 232 с.
56. Акт-отчет № 207/037-502/98 по техническому состоянию подшипников качения после длительных испытаний двигателя Д-30КУ-154 № 485-459 до общей наработки 18000 часов и для оценки сцинтилляционного метода диагностики двигателя / ПАО «ОДК-Сатурн». – Рыбинск, 1998. – 19 с.
57. Bowen, E. R. Wear particle atlas / E. R. Bowen, V. C. Westcott. – Burlington, USA : Foxboro/Trans-Sonics, Inc., 1976. – 55 p.
58. Dempsey, P. J. Investigation of Gear and Bearing Fatigue Damage Using Debris Particle Distributions : tech. rep. / P. J. Dempsey, D. G. Lewicki, H. J. Decker ; National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center. – Cleveland, USA, 2004. – 18 p.

59. Двигатель ПС-90А. Анализ статистики и диагностических признаков дефектов роликового подшипника ТВД : тех. справка № 34676 / ПАО «ОДК-Авиадвигатель». – Пермь, 1999. – 39 с.
60. Prototype instruments built for PRAM / G. Humphrey, J. Rojas, D. Churchill, [et al.] // Proc. 2002 JOAP International Condition Monitoring Conference / JOAP-TSC. – Pensacola, 2002. – P. 1–9.
61. Toms, A. M. Filter debris analysis for aircraft engine and gearbox health management / A. M. Toms, K. Cassidy // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2008. – Vol. 8, no. 2. – P. 183–187.
62. Разработка методик количественного определения химического состава неорганической части в отложениях (остатках) консистентных смазок и легковоспламеняемых жидкостях с применением фотоэлектронных установок типа МФС : отч. по НИР / вч № 75360. – 1978. – 145 с.
63. Франкштейн, Л. Опыт разработки и внедрения перспективных схем и устройств в масляную систему авиационных двигателей / Л. Франкштейн // Конверсия в машиностр. – 2003. – № 3. – С. 72–91.
64. Двигатель ПС-90А. Эксплуатационная поверка многоэлементного спектрального анализа проб масла при диагностике двигателей : бюлл. № 94370-БЭ-Г / ПАО «ОДК-Авиадвигатель». – М., 2005. – 9 с.
65. Юдин, А. Рекомендации по нормированию критериев оценки технического состояния узлов трансмиссии ГТД по результатам спектрального анализа масла / А. Юдин, В. Степанов // Конверсия в машиностроении. – 2002. – № 2. – С. 35–41.
66. Humphrey, G. Filter Debris Analysis of J52-P-408 Engines, Part I / G. Humphrey // Proc. 2002 JOAP International Condition Monitoring Conference / JOAP-TSC. – Pensacola, 2002. – P. 32–41.
67. Toms, A. The success of filter debris analysis for J52 engine condition based maintenance / A. Toms, E. Jordan, G. Humphrey // 41st

- AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit / AIAA [et al.] – Tucson, USA, 2005. – P. 4338.
68. Humphrey, G. R. Filter debris analysis by energy dispersive x-ray fluorescence applied to J52P408 engines / G. R. Humphrey // Advances in X-ray Analysis : Proceedings of Denver X-ray Conference. – 2008. – Vol. 64. – P. 37–47.
69. Day, L. The secret's in the filter / L. Day // Tribology & Lubrication Techology. – 2008. – Vol. 64, no. 2. – P. 32–37.
70. Двигатели Д-30КП/КУ/КУ-154, имевшие неисправности узлов и агрегатов, омываемых маслом, при контроле сцинтилляционным методом : тех. отч. / ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2008. – 18 с.
71. Разработка технологии диагностирования авиадвигателей, оснащённых фильтроэлементом с диагностическим слоем / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). – 2014. – 5–3 (47). – С. 212–218.
72. Диагностика узлов авиационных газотурбинных двигателей, омываемых смазочным маслом, по результатам анализа пробы смыва с диагностического слоя фильтроэлемента / В. Дроков, В. Дроков, В. Мурыщенко [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 8. – С. 39–43.
73. Дроков В. Г. Повышение достоверности результатов диагностирования газотурбинных двигателей сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта», 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (по отраслям)» : дис. ... д-ра техн. наук / В. Г. Дроков ; ГосНИИ ГА. – М., 2009. – 325 с.

74. Дзюба, А. Оптимизация базовой экспозиции твердотельного детектора излучения в сцинтилляционном атомно-эмиссионном спектральном анализе / А. Дзюба, В. Лабусов, С. Бабин // Аналитика и контроль. – 2015. – Т. 19, № 1. – С. 6–12.
75. Прокопчук, С. Сцинтилляционный спектральный анализ в геологии / С. Прокопчук. – Иркутск : Институт геохимии СО РАН, 1994. – 64 с.
76. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : сайт : страница СИ : № 64278-16, Анализаторы сцинтилляционные, САМ-ДТ-01-2. – URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/377944> (дата обращения: 23.05.2022).
77. Патент № 2239172 Российская Федерация. Способ диагностики состояния двигателей : № 2001130399/06 : заявл. 13.11.2011 : опубл. 27.10.2004 / М. С. Гайдай, В. Г. Дроков, А. Казмиров [и др.].
78. Патент № 2082284 Российская Федерация. СВЧ-плазмотрон циклонного типа : № 94044979/07 : заявл. 27.12.1994 : опубл. 20.06.1997 / В. Г. Дроков, А. Д. Казмиров, А. Б. Алхимов.
79. Дроков В. Г. Повышение достоверности результатов диагностирования газотурбинных двигателей сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта», 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (по отраслям)» : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Г. Дроков ; ГосНИИ ГА. – М., 2009. – 42 с.
80. Урманбетов, К. Усовершенствованный двухструйный плазматрон и его возможности в атомно-эмиссионном спектральном анализе / К. Урманбетов, Р. А. Таштанов, Ж. Ж. Жеенбаев // Аналитика и контроль. – 2005. – № 1. – С. 89–94.

81. Walzel, P. Spraying and atomizing of liquids / P. Walzel // Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry / O. Kanji. – Hoboken, New Jersey, USA : Wiley Online Library, 2000. – P. 1–30.
82. Patent no. 4795095 USA. Method of and apparatus for use in measuring the particle size distribution and/or the concentration of particles in suspension in a gaseous dispersing medium : № 06/904930 : Publ. 03.01.1986 / R.M. Shepard.
83. Хмелев, В. Ультразвуковое распыление жидкостей : моногр. / В. Хмелев, А. Шалунов, А. Шалунова. – Бийск : Изд.-во АлтГТУ имени И.И. Ползунова, 2010. – 250 с. – ISBN 978-5-9257-0177-5.
84. Patent no. 2695002 USA. Electrostatic atomizer of liquids : № [N/A] : Publ. 23.11.1954 / M. R. Miller.
85. Kelly, A. Charge injection electrostatic atomizer modeling / A. Kelly // Aerosol Science and Technology. – 1990. – Vol. 12, no. 3. – P. 526–537.
86. Electrostatically atomized hydrocarbon sprays / A. Yule, J. Shrimpton, A. Watkins [и др.] // Fuel. – 1995. – Т. 74, № 7. – С. 1094–1103.
87. Energy efficient primary atomization of viscous food oils using an electrostatic method / P. Vesely, R. Schick, J. Shrimpton, F. Mashayek // Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 237. – P. 27–32.
88. Elmoursi, A. A. Droplet and Flake Size Distribution in the Electrostatic Spraying of Metallic Paint / A. A. Elmoursi, H.-Y. Lee // SAE transactions. – 1989. – Vol. 98. – P. 217–223.
89. Суриков, В. Т. Пневматические распылители с пересекающимися потоками для спектрометрии с индуктивно связанной плазмой / В. Т. Суриков // Аналитика и контроль. – 2010. – № 3. – С. 108–156.
90. Применение ультразвуковых колебаний для распыления жидкостей / В. Хмелев, А. Шалунов, Р. Голых, В. Нестеров // Ультразвук: Проблемы, разработки, перспективы : материалы докладов Междунар. науч. конф.

- (Уфа, 25-29 сентября 2017 г.) / Институт проблем сверхпластичности металлов РАН. – Уфа : РИЦ БашГУ, 2017. – С. 80–82.
91. Lang, R. J. Ultrasonic atomization of liquids / R. J. Lang // The journal of the acoustical society of America. – 1962. – Vol. 34, no. 1. – P. 6–8.
 92. Патент № 2481160 Российская Федерация. Ультразвуковой распылитель : № 2011146974/05 : заявл. 2011-11-18 : опубл. 2013-05-10 / В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, А. В. Шалунова [и др.].
 93. Патент № 98945 Российская Федерация. Ультразвуковой распылитель : № 2010122218/13 : заявл. 2010-05-31 : опубл. 2010-11-10 / В. Дроков, В. Дроков, Ю. Скудаев, В. Хмелев.
 94. Патент № 128521 Российская Федерация. Ультразвуковой распылитель : № 2012154502/058 : заявл. 2012-12-14 : опубл. 2013-05-27 / В. Г. Дроков, Ю. Д. Скудаев, А. Ю. Ходунаев.
 95. Тихонов, А. Уравнения математической физики / А. Тихонов, А. Самарский. – 5-е изд. – Москва : Наука, 1977. – 735 с.
 96. Измерение размеров капель жидкости, получаемых при различных режимах работы ультразвуковых распылителей / В. Хмелев, А. Шалунов, А. Шалунова [и др.] // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 179–184.
 97. Патент № 2569926 Российская Федерация. Способ определения размера капель в аэрозоле : № 2014134964/28 : заявл. 26.08.2014 : опубл. 10.12.2015 / В. Г. Дроков, Д. В. В., Ю. Д. Скудаев, В. А. Яковлев.
 98. Авторское свидетельство № 1832511 СССР. Устройство для распыления сухих порошкообразных препаратов : № 4703669/14 : заявл. 1989-11-04 : опубл. 1996-07-27 / Т. Котова, Р. Пауль, Л. Каратушина.
 99. Райхбаум, Я. Д. Физические основы спектрального анализа / Я. Д. Райхбаум. – Москва : Наука, 1980. – 159 с.

100. Сцинтилляционный способ спектрального анализа в рудах / А. Крестьянинов, Я. Райхбаум, А. Корецкая, Н. Маркова // Журнал прикл. спектроскопии. – 1969. – Т. 10, № 1. – С. 17–21.
101. Шабанова, Е. Дуговой сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ порошковых проб при использовании МАЭС с высоким временным разрешением / Е. Шабанова, А. Бусько, И. Васильева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, № 1/2. – С. 24–33.
102. Передаточная функция СВЧ плазмотрона, как источник сцинтилляционных сигналов / А. Алхимов, В. Дроков, А. Казмиров, В. Морозов // Аналитическая химия. – 1996. – Т. 51, № 9. – С. 939–944.
103. Gmytrasiewicz, P. Fault tree based diagnostics using fuzzy logic / P. Gmytrasiewicz, J. A. Hassberger, J. C. Lee // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1990. – Vol. 12, no. 11. – P. 1115–1119.
104. Gas-turbine fault diagnostics: a fuzzy-logic approach / S. Ogaji, L. Marinai, S. Sampath, [et al.] // Applied Energy. – 2005. – Vol. 82, no. 1. – P. 81–89.
105. Mechefske, C. Objective machinery fault diagnosis using fuzzy logic / C. Mechefske // Mechanical systems and signal processing. – 1998. – Vol. 12, no. 6. – P. 855–862.
106. Bilski, P. Automated diagnostics of analog systems using fuzzy logic approach / P. Bilski, J. M. Wojciechowski // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2007. – Vol. 56, no. 6. – P. 2175–2185.
107. Флах, П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных : пер. с англ. / П. Флах. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 399 с. – ISBN 978-5-97060-273-7.
108. No free lunch theorems for optimization / D. H. Wolpert, W. G. Macready, [et al.] // IEEE transactions on evolutionary computation. – 1997. – Vol. 1, no. 1. – P. 67–82.

109. Motor bearing fault detection using spectral kurtosis-based feature extraction coupled with K-nearest neighbor distance analysis / J. Tian, C. Morillo, M. H. Azarian, M. Pecht // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – Vol. 63, no. 3. – P. 1793–1803.
110. He, Q. P. Fault detection using the k-nearest neighbor rule for semiconductor manufacturing processes / Q. P. He, J. Wang // IEEE transactions on semiconductor manufacturing. – 2007. – Vol. 20, no. 4. – P. 345–354.
111. Yuan, M. Fault diagnosis and remaining useful life estimation of aero engine using LSTM neural network / M. Yuan, Y. Wu, L. Lin // 2016 IEEE international conference on aircraft utility systems (AUS) / IEEE. – Beijing, China, 2016. – P. 135–140.
112. Learning to monitor machine health with convolutional bi-directional LSTM networks / R. Zhao, R. Yan, J. Wang, K. Mao // Sensors. – 2017. – Vol. 17, no. 2. – P. 273.
113. Bruin, T. de. Railway track circuit fault diagnosis using recurrent neural networks / T. de Bruin, K. Verbert, R. Babuška // IEEE transactions on neural networks and learning systems. – 2016. – Vol. 28, no. 3. – P. 523–533.
114. Fault diagnosis in spur gears based on genetic algorithm and random forest / M. Cerrada, G. Zurita, D. Cabrera, [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 70. – P. 87–103.
115. Gearbox fault diagnosis based on deep random forest fusion of acoustic and vibratory signals / C. Li, R.-V. Sanchez, G. Zurita, [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 76. – P. 283–293.
116. Yang, B.-S. Random forests classifier for machine fault diagnosis / B.-S. Yang, X. Di, T. Han // Journal of mechanical science and technology. – 2008. – Vol. 22, no. 9. – P. 1716–1725.
117. Чистяков, С. П. Случайные леса: обзор / С. П. Чистяков // Труды Карельского научного центра РАН. – 2013. – № 1. – С. 117–136.

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по работе с госорганами и
индустриальными партнерами ИРНИТУ

Е.Ю. Семенов

“ 8 ” 04 2022 г.



о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертационной работы
Ходунаева Александра Юрьевича

Комиссия в составе:

председатель: Е.Ю. Семенов, проректор ИРНИТУ по работе с госорганами и
индустриальными партнерами;

члены комиссии: И.А. Калошин, начальник научно-исследовательской части,
Н.А. Иванов, научный руководитель работы

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы "Алгоритмическое и аппаратное обеспечение для повышения достоверности контроля авиационных газотурбинных двигателей СВЧ-плазменным методом", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в деятельности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО ИРНИТУ) при разработке СВЧ-плазменного комплекса для анализа частиц износа в смазывающих жидкостях машин и механизмов для диагностики их состояния.:

По результатам совместных разработок получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по теме: "Разработка и создание программно-аппаратного СВЧ плазменного комплекса для мониторинга, контроля и безопасной эксплуатации маслосистемы двигателей наземного и воздушного назначений" № гос.регистрации АААА-А18-118112990020-0.

Председатель комиссии  Е.Ю. Семенов

Члены комиссии:  И.А.Калошин

 Н.А. Иванов