

На правах рукописи



**ДРОКОВ ВИКТОР ВЛАДИСЛАВОВИЧ**

**МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ  
ТРЕНИЯ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВИАЦИОННЫХ  
ГТД ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТИЦ ИЗНАШИВАНИЯ**

Специальность: 2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

**автореферат диссертации**  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на кафедре «Двигатели летательных аппаратов».

**Научный руководитель** Доктор технических наук, профессор, декан Механического факультета, заведующий кафедрой «Двигатели летательных аппаратов» МГТУ ГА  
**Машошин Олег Федорович**

**Официальные оппоненты** Доктор технических наук, ведущий специалист отдела сертификации и летной годности публичного акционерного общества «ОДК-Сатурн»  
**Шепель Вячеслав Тимофеевич**

Доктор технических наук, заместитель по эксплуатации главного конструктора акционерного общества «Уфимское агрегатное производственное объединение»  
**Мусин Сергей Миргасович**

**Ведущая организация** Государственный научный центр, федеральное автономное учреждение «**Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова**» (ГНЦ ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Защита состоится «04» февраля 2026 года в 15.00 на заседании диссертационного совета 42.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) и на сайте [www.mstuca.ru](http://www.mstuca.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Отзывы на автореферат направлять в двух экземплярах, заверенных печатью организации, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета 42.2.001.01  
доктор технических наук, профессор



В.М. Самойленко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Создание авиадвигателей нового поколения, параметры и характеристики которых соответствуют мировому уровню, является одной из приоритетных задач российской авиационной промышленности. Среди большого числа проблем, решаемых моторостроительными КБ при разработке двигателей, актуальной является проблема достижения высокого уровня надежности силовой установки (снижение частоты аварийных выключений в полете, снижение частоты ремонтов, повышение ресурса до первого снятия с крыла).

Частота аварийных выключений двигателя в полете во многом зависит от уровня приборного и технологического обеспечения систем диагностирования двигателя, способных выявить повреждение на ранней стадии развития и контролировать его до предотказного состояния. В ряду решения диагностических задач актуальным является создание и совершенствование технологии оценки состояния узлов ГТД, омываемых смазочным маслом, так как до 30 % неисправностей в полете связано с повреждениями узлов маслосистемы двигателя.

В настоящее время оценка технического состояния систем авиадвигателя, омываемых смазочным маслом, производится методами бортовой и наземной диагностики, применяемыми, как правило, совместно.

Бортовая система диагностирования представлена различными типами фильтров-сигнализаторов (ФСС), магнитными пробками (МП), датчиками вибрации, температуры и т.д. По сообщениям российских и зарубежных эксплуатантов, методами бортового диагностирования повреждения могут быть обнаружены только непосредственно перед разрушением узла, во время его разрушения или вообще могут быть не обнаружены. Поэтому системы бортового диагностирования, фактически, являются первичной формой защиты двигателя и не могут играть большой роли при планировании обслуживания двигателей.

Наземные методы, призванные обеспечивать углубленную оценку технического состояния, не всегда обеспечивают высокую достоверность результатов. На протяжении длительного времени разработчики систем диагностирования совершенствовали аппаратуру, улучшали метрологические характеристики используемых приборов, разрабатывали методики подготовки проб к анализу и измерения массовой доли металлических примесей в пробе масла. Названные мероприятия не привели к существенному повышению достоверности диагностирования.

В последние годы интерес разработчиков проявляется к исследованию проб смыва с маслофильтра. Однако при оценке технического состояния по результатам анализа пробы с маслофильтра проблемой остается выбор и выявление эффективных диагностических признаков, связывающих параметры частиц изнашивания с техническим состоянием авиационного ГТД.

В НИИ прикладной физики ИГУ разработан СВЧ плазменный (сцинтилляционный) метод, позволяющий измерять параметры частиц изнашивания, как в пробах масла, так и в пробах смыва с маслофильтра (фильтроэлемента). Использование данного метода для оценки технического состояния узлов маслосистемы ГТД позволило эмпирически найти новые эффективные диагностические признаки в пробе смыва, обеспечивающие оценку состояния двигателя с точностью до узла с достоверностью до 90 %.

Для анализа пробы смыва с маслофильтра найдены новые диагностические признаки, такие как отношение общего количества «сложных» частиц, состоящих из двух и более элементов, к общему количеству «простых» частиц изнашивания, состоящих из одного элемента ( $V_{\text{общ}}$ ) и доля количества «сложных» частиц изнашивания определённого состава в общем количестве частиц изнашивания ( $R_{\text{сл}}$ ).

Видно, что найденные диагностические признаки связаны с количеством частиц и их элементным составом. Резервы в повышении достоверности диагностирования СВЧ плазменным методом кроются в понимании роли маслофильтра при различных типах изнашивания и правильности измерения параметров частиц изнашивания.

Настоящая диссертационная работа посвящена актуальной проблеме разработки новых методов контроля и обоснованных технологических решений для создания высокодостоверной

методики диагностирования узлов трения авиационных ГТД по параметрам частиц изнашивания на основе использования СВЧ плазменного метода.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в разработку и внедрение инструментальных методов оценки состояния узлов и деталей авиационных ГТД по параметрам частиц изнашивания внесли работы ведущих профильных институтов и университетов: ЦИАМ имени П.И. Баранова, ИАЦ ФГУП ГосНИИ ГА, ФГБОУ ВО МГТУ ГА, моторостроительные конструкторские бюро России: АО «ОДК-Авиадвигатель», производственный комплекс «Салют» АО ОДК, ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «ОДК-Пермские моторы», АО «ОДК-Климов» и пр., а также работы отечественных ученых, в том числе, Биргера И. А., Крагельского И. В., Буше Н. А., Калашникова С. И., Степанова В. А., Гаркунова Д. Н., Степаненко В. П., Кюрегяна С. А., Сиротина Н.Н., Богоявленского А. А., Пивоварова В. А., Машошина О. Ф., Грядунова К.И., Дасковского И. М. и др.

В последние годы в связи с интенсификацией эксплуатации авиационной техники повысился интерес исследователей и производителей двигателей к проблеме высокодостоверного контроля состояния узлов и деталей ГТД, омываемых смазочным маслом. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является подход, учитывающий параметры частиц изнашивания в пробе масла и пробе смыва с маслофильтра.

**Объект исследования.** Система смазки узлов трения авиационного ГТД, накапливающая металлические частицы изнашивания, несущая информацию о состоянии поверхности трущихся деталей.

**Предмет исследования.** Процессы изнашивания пар трения, омываемых смазочным маслом.

**Целью** диссертационной работы является разработка и совершенствование СВЧ плазменного метода для диагностирования технического состояния узлов трения авиационных ГТД Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 и ПС-90А с высокой степенью достоверности на всех этапах жизненного цикла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить влияние тонкости фильтрации маслофильтра на параметры частиц изнашивания (массовую долю) при нормальном, повышенном и импульсном поступлении частиц в маслосистему двигателя;

- оценить возможность своевременного выявления повреждения деталей при импульсном поступлении частиц в систему смазки двигателя;

- оценить распределение частиц по размерам в двигателях с разным техническим состоянием;

- оценить правильность определения элементного состава частиц изнашивания при СВЧ плазменных измерениях;

- объяснить причину регистрации одноэлементных частиц;

- оценить зависимость числа зарегистрированных многоэлементных частиц от технического состояния двигателя;

- разработать методику диагностирования авиационных ГТД на основе результатов СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла и смыва с маслофильтра (фильтроэлемента) двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Методом статистического моделирования с использованием реальных параметров частиц изнашивания и масляных фильтров рассчитано распределение металлической примеси между фильтром и масляной системой авиадвигателя. Установлено, что чем меньше размер ячеек фильтра, тем более серьезный износный процесс должен происходить в маслосистеме, чтобы величина массовой доли в пробе масла превысила граничное значение и в двигателе был обнаружен повышенный износ.

2. Установлено, что обнаружение повреждения деталей по величине массовой доли в пробе масла при развитии процесса выкрашивания возможно в случаях, когда размер ячеек маслофильтра превышает средний размер частиц выкрашивания. В соответствии с полученными

результатами превышение граничного значения  $C_{Fe} = \bar{x} + 3\sigma$  в пробе масла при использовании 75 мкм фильтра возможно при выбросе частиц со средним размером, не превышающим 18 мкм, а при использовании 40 мкм фильтра со средним размером частиц не более 5 мкм. В иных случаях оценка состояния двигателя *по величине массовой доли* при данном типе изнашивания не эффективна.

3. Установлено, что в двигателях с повреждением поверхностей пар трения распределение частиц по размерам может быть неотличимо от распределения частиц, характерного для исправного двигателя, когда основное количество частиц сосредоточено в классах от единиц до 80 мкм. При повреждении узла(ов) в этом классе увеличивается только их общее количество. Этот факт меняет требования к измерительной аппаратуре-аппаратура должна выдавать информацию о параметрах частиц во всем возможном диапазоне их изменения их размеров, что позволит диагностам принимать более обоснованные решения по техническому состоянию двигателя.

4. Найдено, что в исправном двигателе и в двигателях с повреждениями различных узлов отсутствуют частицы, элементные содержания в которых соответствуют паспортному составу сплавов, используемых в конструкции двигателей. Разброс по содержаниям элементов, входящих в состав сплавов, может отличаться от паспортных значений в десятки раз. Несоответствие элементного состава частиц изнашивания паспортному составу сплавов может являться одной из причин досрочного повреждения узла(ов) двигателя;

5. Показана необходимость одновременного учета при диагностировании параметров частиц в пробе масла и пробе смыва с маслофильтра. В этом случае влияние параметров маслофильтра и примеси на оценку состояния двигателя будет снижено и достоверность результатов диагностирования может быть значительно улучшена. Параметры частиц изнашивания в пробе смыва с маслофильтра свидетельствуют о состоянии двигателя в целом, параметры частиц в пробе масла характеризуют, как правило, повреждения узлов коробки(ок) приводов, центрального привода.

**Теоретическая значимость** заключается в разработке математической модели, описывающей влияние параметров маслофильтра на достоверность выявления повреждения при непрерывном и импульсном поступлении частиц в маслосистему двигателя; статистические математические модели исправного двигателя по параметрам частиц изнашивания, позволяющие оценивать его техническое состояние на всем протяжении жизненного цикла; обоснование возможности выбранных диагностических признаков для высокодостоверной оценки узлов маслосистемы ГТД.

**Практическая значимость** работы:

— разработана научно-техническая документация для внесения анализатора САМ-ДТ-01-2 в реестр Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. Приказом от 13 июля 2016 г. № 1015 анализатор САМ-ДТ-01-2 внесен в реестр под № 63023, как средство измерения.

— разработана научно-обоснованная методика диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным анализатором. Методика диагностирования Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 прошла метрологическую экспертизу в ГосНИИ ГА.

— разработанная методика для Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 адаптирована для оценки состояния двигателей ПС-90А и ПД-14.

— для сотрудников АО «ОДК-Авиадвигатель» разработана специальная учебная программа. Проведено обучение сотрудников АО «ОДК-Авиадвигатель» по работе на СВЧ плазменном анализаторе и диагностированию двигателей ПС-90А и ПД-14 СВЧ плазменным методом.

— разработанные подходы по диагностированию смазываемых узлов трения двигателей позволили расширить области применения СВЧ плазменного анализатора. В частности, получены положительные результаты по оценке состояния газозоодушного тракта и топливной аппаратуры ГТД.

**Методы исследования.** В процессе выполнения исследований применялись прикладные методы аналитической химии (СВЧ плазменный, атомно-абсорбционный,

микрорентгеноспектральный методы анализа). При выполнении вычислительных экспериментов использовались основные положения теории вероятностей, методы математической статистики и методы математической физики.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель процесса фильтрации металлических частиц в маслосистеме двигателя при нормальном, повышенном и импульсном поступлении частиц изнашивания. Модель позволяет оценить характеристики накопления продуктов изнашивания в маслосистеме двигателя в зависимости от параметров маслофильтра и параметров металлической примеси. При оценке состояния двигателя по величине массовой доли частиц достоверность оценки во многом определяется передаточной функцией маслофильтра и видом функции распределения частиц по размерам;

2. Результаты экспериментального определения функции распределения металлических частиц по размерам для разных типов изнашивания и ее связь с техническим состоянием двигателей. Показано, что тип развития повреждения определяет форму и границы распределения частиц по размерам. Установлено, что при повреждении узла чаще всего увеличивается количество частиц в диапазоне размеров от единиц до 80 мкм. Лишь в отдельных случаях, при значительном разрушении узла(ов), основное количество частиц в распределении сдвигается вправо до размеров, превышающих несколько сотен микрометров.

3. Результаты применения признака «элементный состав частиц», полученные СВЧ плазменным методом. Данный признак позволяет выявить не только поврежденный узел, но и степень его повреждения. Показано, что признак «элементный состав частиц» надежно измеряется для частиц изнашивания размером до 80 мкм. Полученные данные верифицированы с помощью независимого микрорентгеноспектрального метода. Сопоставление с выявленными неисправностями показывает надежность применения этого признака.

4. Способ поузловой диагностики авиадвигателей. Впервые показано, что в исправных двигателях и в двигателях с повреждениями различных узлов в большинстве случаев отсутствуют частицы, элементный состав которых соответствует паспортному составу сплавов, используемых в конструкции двигателей. Для двигателей, имеющих повреждение какого-либо узла, в составе частиц изнашивания обнаруживается преобладающий тип частиц со схожим элементным составом. В таком случае элементный состав этих частиц с большой долей вероятности указывает на поврежденный узел, даже если состав частиц не полностью соответствует определенному типу сплава.

5. Методика определения технического состояния двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 СВЧ плазменным методом на основе применения статистической модели исправного двигателя. Достоверность определения технического состояния двигателя с использованием данной методики составляет порядка 90% с точностью до узла.

**Достоверность** и обоснованность результатов. Защищаемые научные положения и выводы базируются на результатах экспериментов и проведенных расчетах. Данные по параметрам частиц верифицировались с помощью независимых контрольных сертифицированных методов анализа. Обоснованность статистических моделей обеспечена значительным объемом выборок. Методики измерения параметров частиц и диагностирования прошли поверку и экспертизу в профильных ведомственных учреждениях. Результаты диагностирования подтверждены заводской разборкой двигателей.

**Достоверность** и обоснованность результатов. Защищаемые научные положения и выводы базируются на результатах экспериментов и проведенных расчетах. Данные по параметрам частиц верифицировались с помощью независимых контрольных сертифицированных методов анализа. Обоснованность статистических моделей обеспечена значительным объемом выборок. Методики измерения параметров частиц и диагностирования прошли поверку и экспертизу в профильных ведомственных учреждениях. Результаты диагностирования подтверждены заводской разборкой двигателей.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на следующих конференциях:

1. XV Международный симпозиум «Применение анализаторов МАЭС в промышленности» (ООО «ВМК-Оптоэлектроника»; Институт автоматики и электрометрии СО РАН; Новосибирский государственный технический университет – Новосибирск, 2016г).

2. XVI Международный симпозиум «Применение анализаторов МАЭС в промышленности» (ООО «ВМК-Оптоэлектроника»; Институт автоматики и электрометрии СО РАН; Новосибирский государственный технический университет – Новосибирск, 2018г).

3. 6-я Международная научно-техническая конференция «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», 2017г;

4. X научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов её эксплуатации" (Иркутский филиал ФГБОУ ВПО МГТУ ГА. – Иркутск, 5-7 декабря 2017 г.);

**Личный вклад.** Автор осуществил постановку задач исследования, организовал проведение СВЧ плазменных измерений, принимал непосредственное участие в разработке методики поузлового диагностирования двигателей Д-30/КП/КП-2/КУ/КУ-154. Лично автором проведен вычислительный эксперимент по влиянию параметров маслофильтра на распределение металлической примеси в маслосистеме и на маслофильтре в зависимости от типа изнашивания, при участии автора разработана методика подготовки проб для микрорентгеноспектральных измерений, обработаны и интерпретированы результаты СВЧ плазменных и микрорентгеноспектральных измерений. Автором лично выполнены экспериментальные работы по влиянию функции распределения частиц по размерам на техническое состояние двигателя. При непосредственном участии автора разработана и защищена патентом на изобретение РФ конструкция ультразвукового распылителя масляных проб, разработана схема динамической регистрации аналитического сигнала, позволившая получать результаты измерений независимо от формы нахождения металлической примеси в пробе масла

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, изданных в журналах, рекомендованных ВАК. Кроме того, в процессе выполнения работы получено 3 патента на изобретения.

**Реализация результатов работы.**

На ПАО «ОДК-Сатурн» поставлен СВЧ плазменный анализатор, передана методика диагностирования двигателей Д-30/КП/КП-2/КУ/КУ-154.

На АО «ОДК-Авиадвигатель» поставлен, запущен и поверен СВЧ плазменный анализатор САМ-ДТ-01-2. Передана методика диагностирования двигателей ПС-90А.

Полученные результаты 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. Результаты внедрены при выполнении ПНИЭР по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» по теме «Разработка и создание программно-аппаратного СВЧ плазменного комплекса для мониторинга, контроля и безопасной эксплуатации маслосистемы двигателей воздушного и наземного назначений» № гос.регистрации АААА-А18-118112990020-0.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 167 страниц, включая 26 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 106 источников.

Работа 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность работы, дана ее краткая характеристика. Изложены объект, предмет исследования, цель и задачи работы, методы исследования, научная новизна, практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, апробация результатов работы, количество публикаций, приведена структура и объём диссертации.

В первой главе на основании анализа и обобщения известных данных рассматриваются причины недостаточной достоверности результатов определения технического состояния узлов маслосистемы ГТД. Выявлены факторы, влияющие на достоверность постановки диагноза по результатам анализа пробы масла:

1. Технология отбора пробы масла с коробки приводов и маслобака, не учитывает крупные частицы изнашивания.

2. Использование в конструкции двигателя тонкоячеистых 15 мкм маслофильтров, Это приводит к снижению равновесного содержания массовой доли металлов в пробе масла до уровня менее 0,1 г/т. Предел обнаружения традиционной аппаратуры (БАРС-3, ПРИЗМА Спектроскан, Spectroil и т.д.) не позволяет с достаточной точностью измерять величину такого порядка, что является одной из причин недостоверных результатов диагностирования.

3. Проба масла, отобранная с коробки приводов, характеризует состояние узлов, как правило, только коробки приводов, центрального привода. Лишь в отдельных случаях при использовании 80 мкм маслофильтров возможно, в том числе, выявление повреждения узлов трансмиссионной части двигателя.

Перспективным методом для получения высокодостоверной информации о параметрах частиц изнашивания в пробе масла и смыва с маслофильтра для диагностирования ГТД является атомно-эмиссионный СВЧ плазменный метод. Сформулированы основные задачи для достижения поставленной цели: оценить влияние тонкости фильтрации маслофильтра на параметры частиц изнашивания при стационарном и импульсном поступлении частиц в маслосистему, оценить распределения частиц по размерам в двигателях с разным техническим состоянием, оценить правильность определения элементного состава частиц изнашивания, объяснить причину регистрации одноэлементных частиц. На базе полученных данных разработать методику поузловой оценки технического состояния систем, омываемых смазочным маслом, двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154, используя результаты СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла и смыва с маслофильтра (фильтроэлемента).

### Вторая глава

В течение последних 15-20 лет в конструкцию авиационных ГТД активно внедряются маслофильтры тонкой очистки. За счет повышения степени очистки масла удалось существенно снизить количество продуктов загрязнения и изнашивания, циркулирующих по маслосистеме ГТД. Это, с одной стороны, позволило снизить количество повреждений в двигателях продуктами износа, с другой – за счет более тонкой очистки снизилась средняя величина массовой доли определяемых элементов в анализируемых пробах масел в 10-15 раз. При тонкости фильтрации 15 мкм и среднем размере частиц изнашивания 5-15 мкм на фильтроэлементе осаждается основная масса частиц. Поэтому массовая доля частиц изнашивания, *циркулирующих в системе смазки*, находится на границе предела обнаружения большинства спектральных методов, который составляет порядка 0,1 г/т, что приводит к большим погрешностям при измерении массовой доли и, соответственно, является одной из причин диагностических промахов. Цель данного раздела заключалась в исследовании влияния параметров частиц металлической примеси, циркулирующих в маслосистеме ГТД, параметров маслофильтра и вида износных процессов на выявление повреждений узлов двигателя на различных этапах его жизненного цикла.

Исследование процессов изменения параметров металлической примеси в маслосистеме проводилось методом статистического имитационного моделирования Монте-Карло.

В качестве исходных данных использованы распределения по размерам частиц, построенные по пробам смывов с маслофильтров двигателей Д-30КП/КП-2/КУ с разной

наработкой и разным техническим состоянием. Параметры распределений по четырем выбранным двигателям приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для проведения численного эксперимента

№	Модель	№	Примечание	Наработка ПИР	$D_\mu$	$D_\sigma$	$N_{\text{gist}}$	$D_{\text{max}}$
1	Д-30КП-2	190-041	Исправный	5ч 29м	3,2	1,7	25	50
2	Д-30КП	42-085	Исправный	6ч 13м	24,26	2,66	50	100
3	Д-30КУ	391-213	Повреждение КП	410ч	34,33	2,2	145	290
4	Д-30КП-2	189-021	Повреждение РП ТВД	403ч	33,46	1,93	100	200

где  $D_\mu$ ,  $D_\sigma$  - параметры логнормального распределения,  $N_{\text{gist}}$  - количество классов,  $D_{\text{max}}$  - максимальный размер частиц.

На первом этапе, используя генератор случайных чисел, генерирующий размеры частиц в соответствии с формой логнормального распределения с заданными параметрами ( $D_\mu$ ,  $D_\sigma$ ,  $N_{\text{gist}}$ ,  $D_{\text{max}}$ ), получали набор частиц, суммарная масса которых в заданном объеме масла давала заданную величину массовой доли за временной интервал в 50 ч, что соответствует интервалу отбора пробы масла на анализ. Отправной точкой моделирования принималось исправное состояние двигателя со значением  $C_{Fe}=0,1$  г/т, техническое состояние двигателя характеризовалось граничными значениями массовой доли элемента в пробе масла, где превышение границы  $C_{Fe} = \bar{x} + 2\sigma$  означало наличие повышенного износа (процесса изнашивания), а превышение границы  $C_{Fe} = \bar{x} + 3\sigma$  означает наличие повреждения.

Моделирование показало, что передаточная функция фильтра (параметры фильтра) влияет на распределение массы примеси  $M_{\text{примеси}}$  таким образом, что чем меньше в маслосистеме размер ячеек фильтра, тем более серьезный износный процесс должен идти в маслосистеме (т.е. износный процесс, сопровождающийся большей скоростью генерации примеси  $\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$ ), чтобы величина массовой доли в пробе масла превысила граничное значение  $C = \bar{x} + 2\sigma$  и в двигателе был обнаружен повышенный износ.

Одним из наиболее частых и опасных типов изнашивания при эксплуатации газотурбинных двигателей является выкрашивание поверхностей трения подшипников качения и зубчатых колес. Процесс выкрашивания при моделировании имитировался импульсным поступлением частиц в маслосистему двигателя.

На данном этапе работ импульсное поступление частиц изнашивания происходило на фоне повышенного изнашивания со скоростью генерации примеси в масло, обеспечивающей величину  $C_{Fe}$ , вплотную подступающей к граничному значению  $\bar{x} + 2\sigma$  (верхнее граничное состояние исправного двигателя). Масса порции импульсно поступающих частиц, в свою очередь, самостоятельно обеспечивала достижение в пробе масла параметра  $C_{Fe}$  на уровне  $\bar{x} + 3\sigma$  (верхнее граничное состояние двигателя на особом контроле). Таким образом, при заданном процессе изнашивания в отсутствие маслофильтра поступление такой порции примеси гарантировало бы превышение  $C_{Fe}$  на уровне  $\bar{x} + 3\sigma$  и определение двигателя как неисправного по диагностическому признаку «массовая доля элемента в пробе масла».

В соответствии с условиями моделирования, при различных передаточных функциях фильтра, взаимодействующих с процессом импульсного поступления частиц на фоне повышенного изнашивания, превышение  $C_{Fe}$  на уровне  $\bar{x} + 3\sigma$  происходит только при использовании 75 мкм фильтра и импульсном поступлении частиц со средним размером до 18 мкм. При использовании 40 мкм фильтра отдельно рассчитаны условия превышения  $C_{Fe}$  границы  $\bar{x} + 3\sigma$ , однако выброс частиц с такими параметрами распределения ( $D_\mu^{\text{выброс}} = 5$  мкм,  $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}} = 787850$  мкг) маловероятен.

С практической точки зрения ценность результатов математического заключается в следующем. Согласно нормативной документации, оценка состояния узлов трения двигателя

производится по величине массовой доли, измеренной в пробе масла. Как видно из результатов моделирования, массовая доля металлической примеси в маслосистеме определяется параметрами примеси (частиц изнашивания) и маслофильтра.

Поскольку параметры примеси ( $D_{\mu}$ ,  $D_{\sigma}$ ,  $D_{max}$ ) в пробе масла наперед неизвестны, то для снижения вероятности диагностического промаха необходимо анализировать две пробы: пробу масла и пробу смыва с маслофильтра. В этом случае влияние размеров ячеек и параметров примеси будет снижено.

### Третья глава.

Для разработки поузловой методики и выявления повреждений в двигателе на ранней стадии развития необходимо было получить сведения по распределениям частиц по размерам, их элементному составу, объяснить регистрацию «простых» одноэлементных частиц.

Верификация результатов СВЧ плазменных измерений проводилась с помощью контрольного микрорентгеноспектрального метода, позволяющего с высокой точностью измерять элементный состав частиц в диапазоне размеров от единиц микрометров до нескольких сотен микрометров для большинства элементов периодической таблицы. Для исследования были отобраны пробы с разных типов двигателей (Д-30КП-2, ПС-90А, ПД-14, АИ-24) с различными наработками и различными типами повреждений. В качестве примера на рисунках 1 и 2 представлены результаты измерения функции распределения частиц по размерам для двигателей Д-30КП-2 после приемо-сдаточных испытаний (ПСИ).

Результаты измерения размеров частиц изнашивания показали, что для двигателей Д-30КП-2, при сравнительно близких значениях ППР, распределения по форме могут значительно различаться. Так, например, для двигателя №190-041 правая сторона распределения заканчивается на размерах частиц 15-20 мкм (рисунок 1), в то время как для двигателя №42-085 встречаются единичные частицы размером до 335 мкм (рисунок 2).

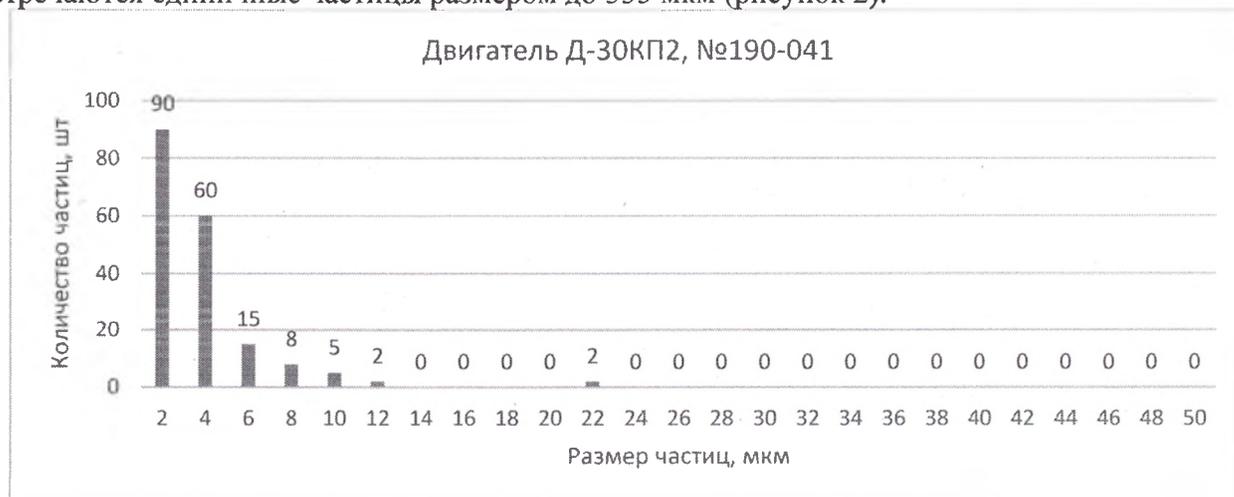


Рисунок 1 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 №190-041 после ПСИ. ППР 5 часов 29 минут.

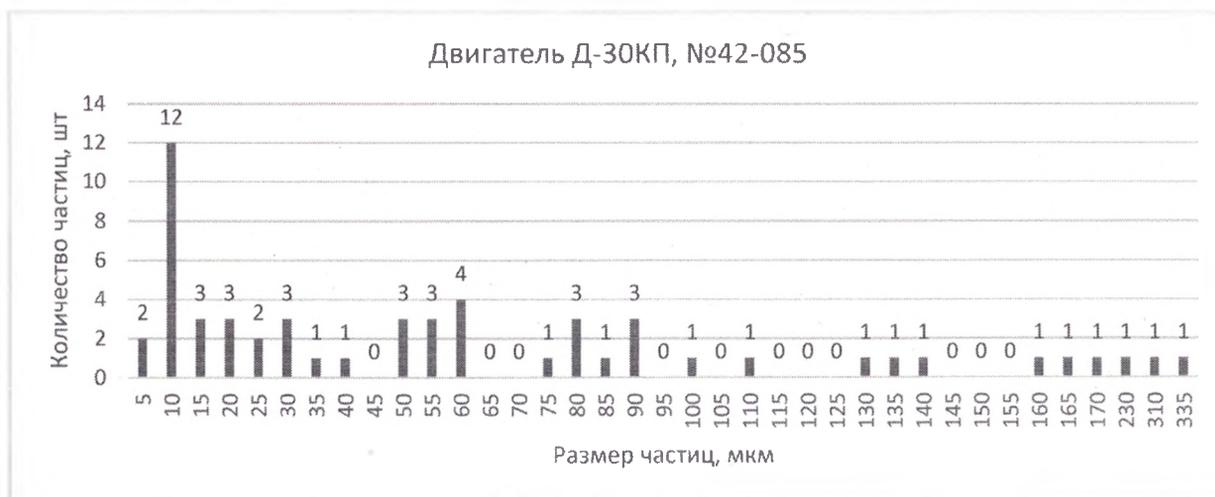


Рисунок 2 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 №42-085 после ПСИ. ППР 6 часов 13 минут.

В двигателе ПД-14 №100-06 более 95% измеренных частиц находится в диапазоне размеров 5-20 мкм, оставшиеся 5% частиц занимают диапазон размеров от 20 до 55 мкм.

Для исследования распределения частиц по размерам в неисправных двигателях были использованы пробы масла с подтвержденными неисправностями коробки приводов: Д-30КУ №391-213 и Д-30КП-2 №394-097 и повреждении узлов центрального привода двигателя ПС-90А №31-040 и двигателя АИ-24 №423-095.

Выявлено, что для данного типа двигателей с такими повреждениями вид распределений получился схожий. Распределения имеют логнормальный вид, основная доля частиц сосредоточена в диапазоне размеров от 5 до 60-70 мкм. Во всех двигателях встречаются крупные единичные частицы размером 150-160 мкм.

При повреждении роликоподшипника турбины высокого давления мотора ПС-90А №72-196, связанным с проскальзыванием роликов подшипника ТВД максимальное количество частиц сосредоточено в классах размером до 60 мкм и мало отличается от распределения частиц для исправного двигателя.

Полученные данные по распределению износных частиц в других двигателях показали, что распределения частиц по размерам в исправных и неисправных двигателях могут перекрываться. Поэтому при оценке технического состояния двигателя недостаточно учитывать только диагностический признак «размер частиц», необходимо выявить и учитывать другие признаки.

Правильность результатов измерения элементного состава СВЧ плазменным методом проводилась путем сличения их с результатами измерений, выполненных на микрорентгеноспектральном анализаторе JXA8000.

В таблице 2 представлены результаты микрорентгеноспектральных измерений элементного состава частиц изнашивания исправного двигателя Д-30КП-2 №190-041.

Таблица 2 – Результаты микрорентгеноспектральных измерений элементного состава частиц изнашивания исправного двигателя Д-30КП-2 №190-041

Элементный состав и измеренные доли элементов (мас.%) в частицах, по результатам микрорентгеноспектральных измерений	Измеренные доли элементов (мас.%) частиц, входящих в сплавы деталей авиационного ГТД	Состав частиц, измеренный микрорентгеноспектральным методом для элементов Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V
1	2	3
O48Ca0,5K1,5Na2,7Si39,5Al6,8-Mg0,6	Si39,5Al6,8Mg0,6	AlMg
Fe0,3C13,2W0,8Cr0,2Cu47,7-Zn36,8Ni0,8	Fe0,3W0,8Cr0,2Cu47,7Zn36,8-Ni0,8	FeCrCuNi
Fe80,9W7,9Cr4,5Cu1,8Zn1,4V2,7-Mn0,6	Fe80,9W7,9Cr4,5Cu1,8Zn1,4-V2,7Mn0,6	FeCuV
Fe80,4C3,9W6,7Cr4,1O0,3Cu1,5-Zn0,6Si0,3V1,3Mn0,7Al0,2	Fe80,4W6,7Cr4,1Cu1,5Zn0,6-V1,3Mn0,7Al0,2	FeCrCuVAl
Fe0,2C32,9W0,3O1,9Cu38,9Zn25,5	Fe0,2W0,3Cu38,9Zn25,5	FeCu
Fe0,1C51,4O3,3Cu27,3Zn16,9V0,2-Ni0,3Al0,3	Fe0,1Cu27,3Zn16,9V0,2Ni0,3-Al0,3	FeCuVAl
Cu37,4Zn10,3Sn6,7Ca0,9O44,1	Cu37,4Zn10,3Sn6,7	Cu
C26,1O2,9Cu47,1Zn22,2Si0,3V0,2-Ni0,4Mn0,3Ag0,2Ti0,2	Cu47,1Zn22,2V0,2Ni0,4Mn0,3-Ag0,2Ti0,2	CuVNiAg
Fe0,5C10,4O3,8Zn0,5V0,5Ni0,4-Al83,9	Fe0,5Zn0,5V0,5Ni0,4Al83,9	FeVNiAl
Fe0,1C8,1Cr0,1O43,4Ca3,8Cu0,9-Na4,2Zn0,6Si25,6Mn0,2Al12,5Mg0,2	Fe0,1Cr0,1Cu0,9Na4,2Zn0,6-Mn0,2Al12,5Mg0,2	FeCrCuAlMg
Fe36,8C13,5O33,9Ca0,7Cu1,6Zn0,6-Si5,9V0,1Mn0,1Al5,5Mg0,9Ti0,1	Fe36,8Cu1,6Zn0,6V0,1Mn0,1-Al5,5Mg0,9Ti0,1	FeCuVAlMg
Fe64,2C18,7W8,2Cr3,4O2,1Cu0,9-Zn0,6Si0,2V0,6Ni0,2Mn0,5Ag0,4	Fe64,2W8,2Cr3,4Cu0,9Zn0,6-V0,6Ni0,2Mn0,5Ag0,4	FeCrCuVNiAg
Fe31C30,37W0,1O3,7Cu0,7Zn0,5-V0,2Ag0,2	Fe31W0,1Cu0,7Zn0,5V0,2Ag0,2	FeCuVAg

В таблице 2 в первом столбце приведены результаты микрорентгеноспектральных измерений исходного элементного состава частиц; во втором – составы тех же частиц, «очищенные» от примесных металлов, не входящих в состав сплавов авиационного ГТД; в третьем – состав тех же частиц, измеренных микрорентгеноспектральным методом для 8-ми элементов (Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V).

Результаты таблицы 2 показывают, что отсутствуют частицы, соответствующие типам сплавов, используемых в конструкции двигателя. Частицы с набором элементов, характерным для сталей (Fe, Cr, Ni, V), содержат нехарактерные элементы Cu, Zn, Al, Ag, Mg.

Результаты микрорентгеноспектральных измерений также показали, что в пробах масел авиационных двигателей обнаруживаются в небольшом количестве одноэлементные частицы размером до 10 мкм, которые составляют не более 10% от числа «простых» частиц, зарегистрированных при СВЧ плазменных измерениях.

При СВЧ плазменных измерениях этих же проб регистрировалось большое количество «простых» одноэлементных частиц. Обнаружение «простых» частиц изнашивания в исправном двигателе, чаще всего представляющих основу сплава по результатам СВЧ плазменных

измерений, объяснялось малым размером частиц, при которых предел обнаружения СВЧ плазменного метода был недостаточным для определения компонентов сплава. Интерес к числу «сложных» и «простых» частиц изнашивания связан с тем, что отношение числа «сложных» и «простых» является одним из диагностических признаков  $V_{\text{общ}}$ , использованных в работе.

В таблице 2 (3 столбец) приведены результаты микрорентгеноспектральных измерений элементного состава тех же частиц, но с учетом только тех элементов (Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V), которые определяются СВЧ плазменным методом. Ограниченное количество элементов, регистрируемое СВЧ плазменным методом, по сравнению с микрорентгеноспектральным, приводит к следующим результатам. При анализе частицы с составом Fe-W-Cu-Zn СВЧ плазменным методом она определяется как частица Fe-Cu, а частица с составом Cu-Sn-Zn определяется как одноэлементная частица Cu.

Отсюда следует, что обнаружение большого количества одноэлементных частиц при СВЧ плазменных измерениях связано с ограниченным количеством регистрируемых элементов, что вносит погрешность в правильность определения, как элементного состава частиц, так и в величину связанных параметров. *Поэтому для более точного определения элементного состава частиц необходимо увеличить количество определяемых элементов СВЧ плазменным методом. В дальнейшей работе к восьми определяемым элементам планируется добавить еще четыре: Si, Ti, Mn, Mo.*

Из сказанного следует, что эффективность диагностического признака  $V_{\text{общ}}$  недостаточна, поэтому при вынесении диагностического решения должны быть использованы дополнительные диагностические признаки. Одним из таких дополнительных диагностических признаков является рейтинг «сложных» частиц  $R_{\text{сл}}$  (доля «сложных» частиц изнашивания определенного состава в общем количестве частиц изнашивания).

По данным микрорентгеноспектральных измерений на рисунке 3 приведено распределение по составам «сложных» частиц для двигателя №22-069. Видно, что наибольшее количество частиц наблюдается состава Ni-Cu, отвечающего за повреждение лабиринтного уплотнения.

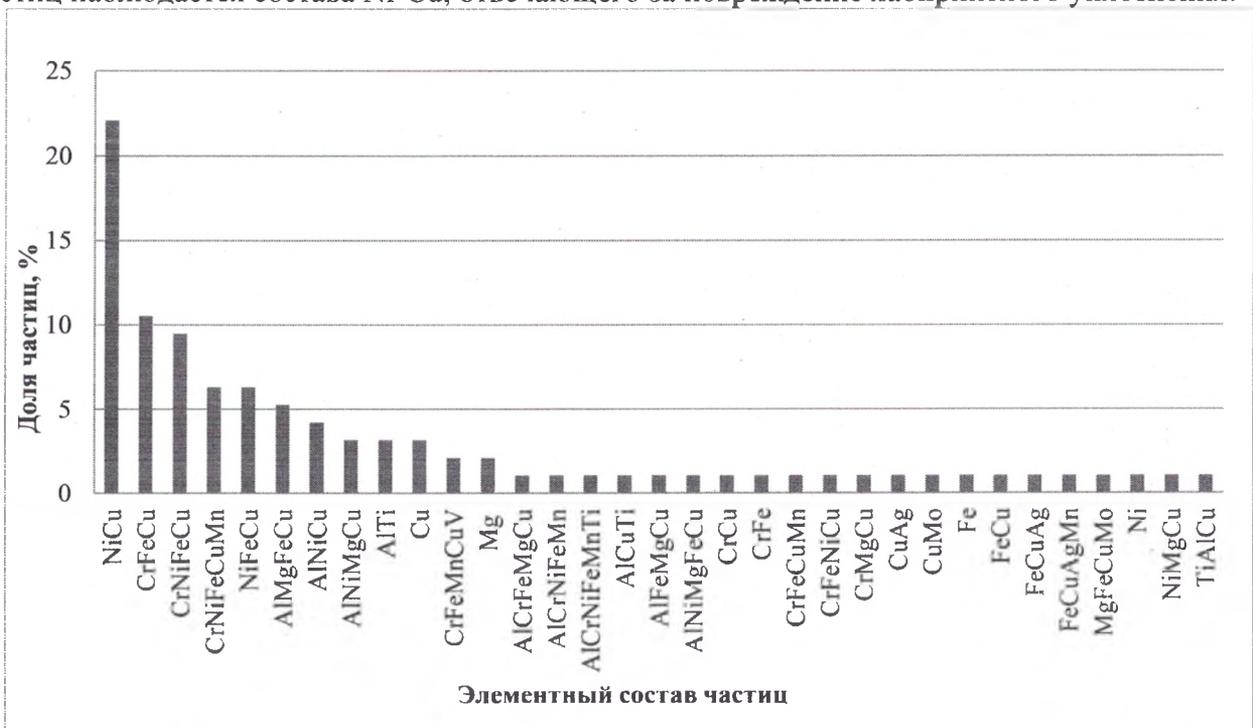


Рисунок 3 – Доли вкладов различных составов частиц в их общее количество в двигателе Д-30КП-2 №22-069 с повреждением по данным микрорентгеноспектральных измерений

СВЧ плазменные измерения пробы смыва с маслофильтра двигателя №22-069 (таблица 3) показали, что наибольшие рейтинги также имеет соединение Ni-Cu, а составы частиц, приведенные в протоколе СВЧ плазменных измерений, полностью соответствуют составам, измеренным микрорентгеноспектральным методом.

Таблица 3 – Фрагмент протокола СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания двигателя Д-30КП-2 №22-069 с повреждением.

Общее количество частиц изнашивания:  $N=18440 \text{ см}^{-3}$

Отношение количества «сложных» частиц к количеству «простых»: **0,84**

Состав сложных частиц	Кол-во сложных частиц	$R_{сл}$
-Ni-Cu	1728	<b>93,71</b>
-Mg-Cu	240,67	13,05
-Cr-Mg	197,33	10,7
-Ni-Mg-Cu	177	<b>9,6</b>
-Ni-Mg	138	<b>7,48</b>
-Mg-Fe	111	6,02
-Al-Mg	81,67	4,43
-Ni-Fe	80	4,34
-Fe-Cu	76,33	4,14

Сравнение результатов СВЧ плазменных и микрорентгеноспектральных измерений элементного состава показывают (рисунок 3, таблица 3), что рейтинг «сложных» частиц  $R_{сл}$  указывает на поврежденный узел, а величина рейтинга свидетельствует о степени поврежденности узла. При этом, чем больше величина рейтинга  $R_{сл}$ , тем хуже состояние узла с данным сплавом.

На рисунке 4 приведена диаграмма распределения исправных двигателей и двигателей с повреждением по количеству составов «сложных» частиц. Для построения диаграммы использованы данные по результатам СВЧ плазменных измерений для 250 двигателей.

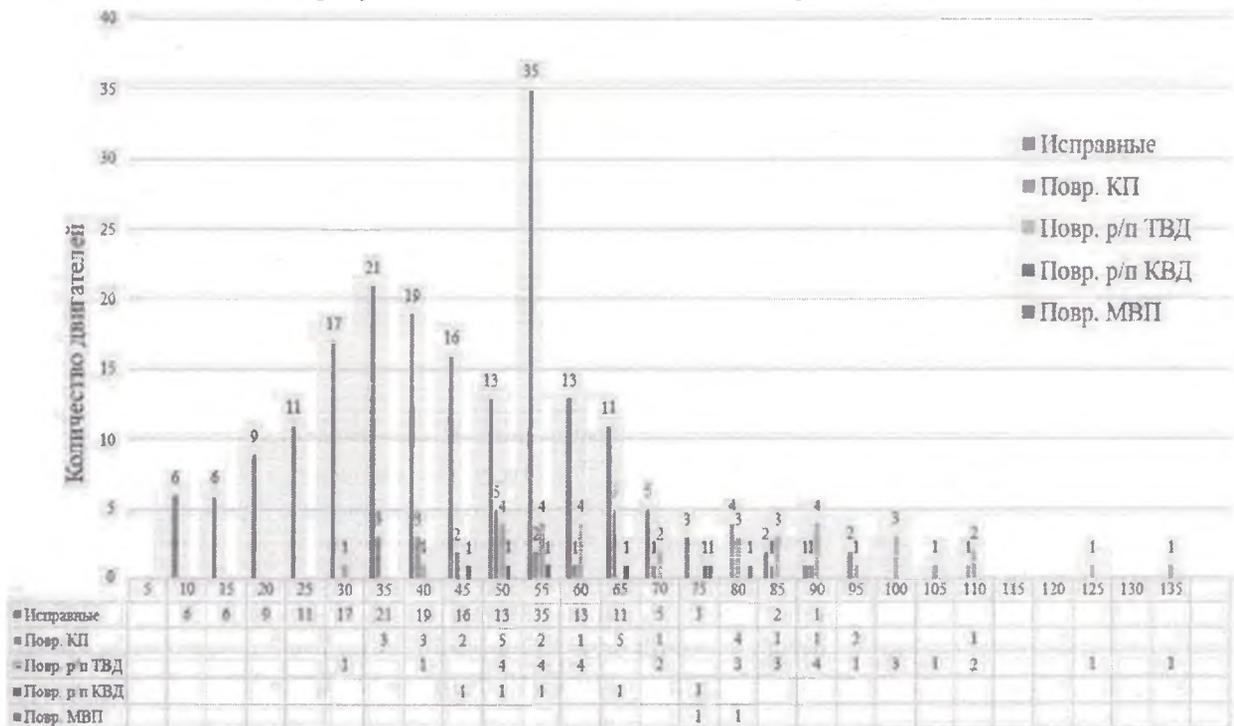


Рисунок 4 – Диаграмма распределения исправных двигателей и двигателей с повреждением в зависимости от количества составов «сложных» частиц

Как видно из рисунка 4, распределения исправных двигателей и двигателей с повреждением налагаются. При этом наблюдается смещение одного распределения относительно другого. Для двигателей с повреждением, характеризующихся большим количеством составов, распределение сдвинуто вправо. Согласно рисунку 4, при количестве составов «сложных» частиц менее 30

*двигатель считается исправным, при количестве больше 90 двигатель с большой долей вероятности имеет повреждение.*

Таким образом, при анализе пробы смыва с маслофильтра, дополнительным диагностическим признаком может служить число составов «сложных» частиц.

Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов при диагностировании узлов системы смазки авиационных газотурбинных двигателей:

— в исправных двигателях функция распределения частиц по размерам имеет логнормальный вид, и граница правой стороны распределения может доходить до нескольких сотен микрометров;

— в двигателях с повреждением распределение частиц по размерам может быть неотлично от распределения частиц, характерного для исправного двигателя. В обоих случаях основное количество частиц сосредоточено *в классах от единиц до 80 мкм*. Независимо от типа и серьезности повреждения левая часть распределений не смещается в сторону больших размеров частиц. В этом классе увеличивается только их общее количество;

— выявлено, что дополнительным фактором степени изношенности узла является количество зарегистрированных «сложных» частиц изнашивания. Чем больше зарегистрировано «сложных» частиц, тем хуже состояние узлов двигателя. Для количественной оценки состояния двигателя используется относительный диагностический признак  $R_{сл}$ . При этом элементный состав частиц свидетельствует о поврежденности конкретного узла, а величина рейтинга о степени повреждения;

— выяснена связь между количеством составов «сложных» частиц, зарегистрированных СВЧ плазменным методом и техническим состоянием двигателя. Двигатель с повреждением характеризуется большим количеством зарегистрированных составов «сложных» частиц. При количестве составов «сложных» частиц менее 30 двигатель считается исправным, при количестве более 90 двигатель с большей долей вероятности имеет повреждение.

Полученные результаты по данным СВЧ плазменных и микрорентгеноспектральных измерений в дальнейшем были использованы для разработки методики диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154.

**В четвертой главе** приведена методика диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным спектрометром.

В методике приведено краткое описание СВЧ плазменного спектрометра и измеряемых им параметров металлической примеси, отобранной из маслосистемы двигателя. Описан порядок поверки спектрометра, процесс отбора проб и их подготовки к измерению параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с фильтра МФС-30.

Приведены сведения об основных измеряемых параметрах и статистических моделях исправных двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154. В приложениях к методике/работе приведены таблицы статистических моделей пробы масла и смыва с маслофильтра для различных интервалов наработки.

Оформление результатов анализа производится в форме протокола, который автоматически заносится в базу данных спектрометра. В протоколе приводятся результаты измерений параметров частиц изнашивания, при этом полученные результаты автоматически сравниваются с параметрами эталонной статистической модели исправного двигателя. В зависимости от уровня превышений принимаются соответствующие решение о техническом состоянии двигателя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено решение актуальной, имеющей важное значение для авиационной промышленности Российской Федерации научно-технической задачи повышения уровня надежности узлов авиационных ГТД, омываемых маслом, требующей разработки и совершенствования наземных способов и методик определения их технического состояния. Решение научно-технической задачи опиралось на проведенный автором и представленный в работе анализ методов и видов проб, применяемых в диагностике авиационных ГТД, а также определяемых этими методами диагностических параметров, позволяющих с разной степенью достоверности определять повреждения узлов маслосистемы.

В ходе исследований в работе были получены следующие основные **результаты**:

1. Разработана математическая модель процесса развития повреждений деталей авиационного ГТД, позволяющая оценить влияние передаточной функции маслофильтра на распределение металлической примеси между маслом и маслофильтром.

2. Обосновано снижение влияния вида изнашивания на достоверность результатов диагностирования при одновременном учете параметров частиц, накопленных на маслофильтре и измеренных в пробе масла.

3. Исследована эффективность различных диагностических параметров при принятии решения о техническом состоянии узлов авиационного ГТД, омываемых маслом.

4. Разработана методика оценки технического состояния маслосистемы двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 СВЧ плазменным методом анализа на всех этапах жизненного цикла.

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие **выводы**:

1. Использование современных маслофильтров ограничивает применение традиционной эмиссионной и рентгеноспектральной аппаратуры при диагностировании ГТД. При указанной тонкости фильтрации величина массовой доли в пробе масла составляет менее 0,1 г/т, что является величиной, сопоставимой с пределом обнаружения названных методов. В таких случаях погрешность измерения массовой доли может возрасти до нескольких сотен процентов, и ее величина не может служить надежным диагностическим параметром.

2. Методом статистического моделирования с использованием реальных параметров частиц износа и масляных фильтров рассчитано распределение металлической примеси между фильтром и масляной системой авиадвигателя. Установлено, что чем меньше размер ячеек фильтра, тем более серьезный износный процесс должен происходить в маслосистеме, чтобы величина массовой доли в пробе масла превысила граничное значение и в двигателе был обнаружен повышенный износ.

3. Установлено, что обнаружение повреждения деталей по величине массовой доли в пробе масла при развитии процесса выкрашивания возможно в случаях, когда размер ячеек маслофильтра превышает средний размер частиц выкрашивания. В соответствии с полученными результатами превышение граничного значения  $C_{Fe} = \bar{x} + 3\sigma$  в пробе масла при использовании 75 мкм фильтра возможно при выбросе частиц со средним размером, не превышающим 18 мкм, а при использовании 40 мкм фильтра со средним размером частиц не более 5 мкм. В иных случаях оценка состояния двигателя по величине массовой доли при данном типе изнашивания не эффективна.

4. В исправных двигателях функция распределения частиц по размерам имеет логнормальный вид и граница правой стороны распределения может достигать до нескольких сотен микрометров. Установлено, что в двигателях с повреждением распределение частиц по размерам может быть неотличимо от распределения частиц, характерного для исправного двигателя. При этом, независимо от типа и серьезности повреждения максимальное количество частиц сосредоточено в классах до 80 мкм. В данных классах, независимо от типа повреждения, всегда увеличивается количество частиц. Это позволяет при СВЧ плазменных измерениях при анализе пробы смыва с маслофильтра в качестве диагностического параметра обоснованно использовать относительные значения количества частиц.

5. Признаком степени изношенности узла является относительное количество зарегистрированных «сложных» частиц изнашивания. Для количественной оценки состояния

двигателя используется рейтинг «сложных» частиц  $R_{сл}$  – количество частиц определенного состава, отнесенное к общему числу зарегистрированных частиц (рейтинг «сложных» частиц изнашивания). При этом элементный состав частиц свидетельствует о поврежденности конкретного узла, а величина рейтинга о степени повреждения.

6. Выяснена связь между количеством составов «сложных» частиц, зарегистрированных СВЧ плазменным методом и техническим состоянием двигателя. Двигатель с повреждением характеризуются большим количеством зарегистрированных составов «сложных» частиц. При количестве составов «сложных» частиц менее 30 двигатель считается исправным, при количестве более 90 двигатель с большей вероятностью имеет повреждение.

Полученные результаты по данным СВЧ плазменных и микрорентгеноспектральных измерений использованы для разработки методики диагностирования двигателей Д-30КП/КП 2/КУ/КУ-154. Разработанная методика диагностирования прошла экспертизу ФГУП ГосНИИ ГА и утверждена первым заместителем генерального конструктора – главным конструктором ПАО «ОДК-Сатурн». Методика применяется в ПАО «ОДК-Сатурн» для определения поврежденных узлов ГТД, в которых сработало табло «Стружка в масле» или была обнаружена стружка на основном маслофилт্রে и контрольных элементах.

Перспективы дальнейшего развития данной темы исследования связаны, прежде всего, с применением СВЧ плазменного анализатора для создания специализированных технологий поузловой оценки технического состояния маслосистемы двигателей ПД-8, ПД-14, ПД-35, вертолетных двигателей, расширением областей применения. В частности, СВЧ плазменный анализатор может быть использован для оценки состояния проточной части газозвдушного тракта, топливной аппаратуры ГТД, гидрокомплекса самолетов.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

##### **Научные публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций (по транспорту):**

1. Дроков В.Г., Дроков В.Вл., Мурыщенко В.В., Ходунаев А.Ю. Использование способов машинного обучения при оценке технического состояния узлов маслосистемы газотурбинных двигателей при СВЧ плазменных измерениях – Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 27. С. 120-130.
2. Дроков В.Г., Дроков В.Вл., Казмиров А.Д., Ходунаев А.Ю. Моделирование процессов фильтрации металлической дискретной примеси в маслосистеме ГТД методом Монте-Карло – Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 27. С. 96-108.
3. Дроков В.Г., Дроков В.Вл., Мурыщенко В.В., Павлова Л.А., Скудаев Ю.Д. Результаты микрорентгеноспектральных измерений состава частиц изнашивания в системе смазки авиационных газотурбинных двигателей – Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 33. с. 19-29.
4. Дроков В.Г., Дроков В.Вл., Мурыщенко В.В., Павлова Л.А., Скудаев Ю.Д. Результаты определения элементного состава металлических частиц изнашивания в пробах авиационных ГТД, измеренные СВЧ плазменным и электронно-зондовым микрорентгеноспектральным (ЭРСМА) методами анализа – Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 33. с. 58-68.
5. Дроков В. Г., Дроков В. Вл., Мурыщенко В. В., Блинов А. В., Мухутдинов Ф. И. Влияние точки отбора на информационную представительность пробы масла при диагностировании авиационных газотурбинных двигателей – Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 93-104.
6. Дроков В. Г., Дроков В. Вл., Мурыщенко В. В., Блинов А. В., Мухутдинов Ф. И. Информационная достаточность диагностических признаков при оценке состояния газотурбинных двигателей по параметрам частиц изнашивания – Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 45. С. 21-31.

7. Дроков В. Г., **Дроков В.В.**, Казмиров А. Д., Карасева Е. Н., Мурыщенко В. В., Скудаев Ю. Д. Оптимизация условий измерения элементного состава частиц изнашивания при применении СВЧ плазменного анализатора – Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 45. С. 41-50.

#### Авторские изобретения и полезные модели

1. Патент РФ № 2018120973, 06.06.2018. Устройство позиционирования распыляющей системы // Патент России № 185308. 2018. Бюл. №34 / Берестевич Г.В., **Дроков В.В.**, Дроков В.Г., Скудаев Ю.Д., Ходунаев А.Ю., Мурыщенко В.В.

2. Патент РФ № 2018147450, 29.12.2018. Ультразвуковой распылитель // Патент России № 187161. 2019. Бюл. №6 / **Дроков В.В.**, Дроков В.Г., Казмиров А.Д., Мурыщенко В.В., Скудаев Ю.Д.

3. Патент РФ №2019124700, 05.08.2019. Ультразвуковой распылитель вязких жидкостей // Патент России № 193261. 2019. Бюл. №30 / **Дроков В.В.**, Дроков В.Г., Иванов Н.А., Казмиров А.Д., Мурыщенко В.В., Паньков Л.В., Скудаев Ю.Д.

4. Патент РФ №2020131290, 23.09.2020. СВЧ-плазмотрон с подогревом распыляемого вязкого масла // Патент России № 201278. 2020. Бюл. №34 / **Дроков В.В.**, Дроков В.Г., Мурыщенко В.В., Скудаев Ю.Д.

#### Публикации в других изданиях

1. Дроков В.Г., **Дроков В.В.**, Мурыщенко В.В., Мухутдинов Ф.И., Скудаев Ю.Д., Халиуллин В.Ф. Диагностика узлов авиационных газотурбинных двигателей, омываемых смазочным маслом, по результатам анализа пробы смыва с диагностического слоя фильтроэлемента – Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 8. С. 39-43;

2. Дроков В.Г., **Дроков В.В.**, Казмиров А.Д., Синицкая А.В., Ходунаев А.Ю. Формирование и выделение аналитического сигнала при исследовании авиационных масел атомно-эмиссионным сцинтилляционным методом – Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 6. С. 39-43;

3. Дроков В. Г., **Дроков В.В.**, Казмиров А. Д., Карасева Е. Н., Мурыщенко В. В., Скудаев Ю. Д. Разработка ультразвукового распылителя СВЧ-плазменного комплекса для анализа авиационных масел – Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 5. С. 42-49.

4. Drokov V.G., **Drokov V.V.**, Ivanov N.A., Myrishenko V.V., Skudaev Y.D., Hodunaev A.Y. Technical state evaluation of oil-lubricated parts and units of aircraft gas turbine engines using microwave plasma method. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. С. 012058.

5. Drokov V.G., **Drokov V.V.**, Ivanov N.A., Myrishenko V.V., Skudaev Y.D., Hodunaev A.Y. Development of microwave plasma method for measurement of wear particle parameters in lubricant oil samples from aircraft gas turbine engines. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. С. 012059.

6. Drokov V.G., **Drokov V.V.**, Kaloshin A.E., Skudaev Y.D., Myrishenko V.V., Hodunaev A.Y. Ultrasonic sprayer of liquid samples for atomic-emission microwave plasma analyzer. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. С. 012060.

Соискатель

В. В. Дроков