

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Д.т.н., профессор
Машошин Олег Федорович

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Влияние некоторых факторов на достоверность принятия диагностического решения при оценке технического состояния маслосистемы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) при спектральных измерениях параметров частиц изнашивания	16
1.1 Отбор пробы масла с коробки приводов и маслобака.....	18
1.1.1. Отбор пробы с контрольных элементов	21
1.1.2. Отбор частиц изнашивания, накопленных на основном маслофилт্রে	22
1.2 Диагностические параметры, позволяющие выявлять повреждения в ГТД по результатам анализа пробы масла	26
1.3. Диагностические параметры при анализе пробы смыва с маслофилтра/филт্রেэлемента СВЧ плазменным методом.....	33
Выводы по главе 1	34
Глава 2. Математическое моделирование процессов развития повреждений деталей и сборочных единиц, работающих в масле	38
2.1. Исходные данные для моделирования.....	40
2.2. Моделирование процессов филтрации металлической примеси при нормальном изнашивании	46
2.3. Моделирование процесса филтрации при наличии источника частиц, переменного во времени (импульсное поступление частиц)	52
Выводы по главе 2.....	64
Глава 3. Обоснование и совершенствование способов измерения параметров частиц изнашивания СВЧ плазменным методом для оценки технического состояния узлов маслосистемы ГТД.....	66
3.1. Краткая характеристика и возможности СВЧ плазменного метода	67

3.2. Краткая характеристика и возможности микрорентгеноспектрального метода .	70
3.3. Распределение частиц по размерам в исправных двигателях и двигателях с повреждениями.....	72
3.3.1. Распределение частиц по размерам в исправных двигателях	72
3.3.2. Распределение частиц по размерам при повреждении коробок приводов и центрального привода.....	76
3.3.3. Распределение частиц по размерам при повреждении роликоподшипника турбины высокого давления и лабиринтного уплотнения	79
3.3.4. Влияние вида распределения частиц по размерам на определение повреждений СВЧ плазменным методом	83
3.3.5. Оценка связи между количеством составов «сложных» частиц, определенных СВЧ плазменным методом и техническим состоянием двигателя	91
3.4. Элементный состав частиц изнашивания по результатам микрорентгеноспектральных и СВЧ плазменных измерений.....	93
3.4.1. Элементный состав частиц изнашивания по результатам микрорентгеноспектральных измерений.....	95
3.4.2. Сравнительные результаты СВЧ плазменных и микрорентгеноспектральных измерений параметров частиц изнашивания в двигателях ПС-90А и Д-30КП-2.	100
Выводы по главе 3.....	105
Глава 4. Методика оценки технического состояния маслосистемы двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154.....	107
4.1 Общие сведения.....	107
4.2 Принципы оценки технического состояния узлов, омываемых смазочным маслом, двигателей Д-30/КП/КП-2/КУ/КУ-154 по результатам анализа проб масел и смыва с маслофильтра МФС-30	109
4.2.1. Статистические модели исправных двигателей для проб масел и смывов с МФС-30	110

4.2.2. Основные типы развития повреждений, выявляемые методикой диагностирования.....	112
4.3. Оценка технического состояния двигателя, находящего в эксплуатации	113
4.3.1. Двигатель в норме	113
4.3.2. Двигатель в зоне особого контроля.....	113
4.3.3. Двигатель в зоне повышенного износа (зона предельных значений)	115
4.4. Рекомендуемый порядок локализации повреждения	117
4.4.1. Признаки повышенного изнашивания зубчатых колес коробки приводов	117
4.4.2. Признаки повышенного изнашивания подшипников коробки приводов...	118
4.4.3. Признаки повышенного изнашивания маслоагрегатов	119
4.4.4. Признаки повышенного изнашивания подшипников трансмиссии	119
4.4.5. Признаки повышенного изнашивания лабиринтного уплотнения	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
ЛИТЕРАТУРА	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ В	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ И	154
ПРИЛОЖЕНИЕ К	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Л	157
ПРИЛОЖЕНИЕ М.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Н	159
ПРИЛОЖЕНИЕ П	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Р	165
ПРИЛОЖЕНИЕ С	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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 [1].

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 [2, 3].

Наземные методы, призванные обеспечивать углубленную оценку технического состояния, не всегда обеспечивают высокую достоверность результатов. На протяжении длительного времени [4-7] 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.

Для решения вопроса повышения достоверности диагностирования разработчиками был проявлен интерес к исследованию проб смыва с маслофильтра [2, 8-15]. 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, совместно с заводами-изготовителями авиационных двигателей, разработан СВЧ плазменный (сцинтилляционный) метод, позволяющий измерять параметры частиц изнашивания, как в пробах масла, так и в пробах смыва с маслофильтра (фильтроэлемента) [16-19]. Использование данного метода для оценки технического состояния узлов маслосистемы ГТД позволило эмпирически найти новые эффективные диагностические признаки в пробе смыва, позволяющие оценивать техническое состояние двигателя с точностью до узла с достоверностью до 90 % [20].

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 ($R_{\text{сл}}$) [16].

Найденные в работе [16] диагностические признаки при анализе пробы с маслофильтра связаны с количеством частиц и их элементным составом. Резервы в

повышении эффективности использования СВЧ плазменного метода кроются в аппаратном совершенствовании СВЧ анализатора, понимании роли маслофильтра при различных типах изнашивания и правильности измерения параметров частиц изнашивания.

В последние несколько лет интерес к СВЧ плазменному методу значительно повысился за счет увеличения налета и парка двигателей Д-30/КП/КП-2, соответственно увеличилось и число инцидентов, связанных с узлами маслосистемы. К этому следует добавить существенное приращение парка двигателей семейства ПС-90А.

Настоящая диссертационная работа посвящена актуальной проблеме совершенствования и 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 на всех этапах жизненного цикла авиационных ГТД.

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 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 пламенным методом.

—разработанные подходы по диагностированию смазываемых узлов трения двигателей позволили расширить области применения СВЧ плазменного анализатора. В частности, получены положительные результаты по оценке состояния газозоудного 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 превалирующий 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.

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 маслоfiltре 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 4 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.

Глава 1. Влияние некоторых факторов на достоверность принятия диагностического решения при оценке технического состояния маслосистемы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) при спектральных измерениях параметров частиц изнашивания

Частота аварийных выключений двигателя в полете во многом зависит от уровня приборного и технологического обеспечения систем диагностирования двигателя. Статистика показывает, что процент поступающих двигателей в ремонт с неисправностями узлов маслосистемы от их общего числа может достигать до 30% в зависимости от типа двигателя и условий эксплуатации [1, 21]. Иными словами, бортовой контроль трибосистем двигателя выдает недостаточный объем информации для достоверной оценки его состояния, поэтому дополнительно используются наземные методы.

В России и за рубежом наземный контроль двигателя производится, в том числе, по величине параметров частиц изнашивания, содержащихся в пробе смазочного масла. Для измерения параметров частиц имеется большой выбор современной аналитической аппаратуры (феррографические системы, атомно-эмиссионные и рентгеноспектральные анализаторы, электронные микроскопы, микрорентгеноспектральные анализаторы, СВЧ плазменные анализаторы). Все это нацелено на решение главной проблемы-исключение аварийных выключений двигателя в полете, повышения безопасности полетов.

Оценка степени изнашивания (состояния) смазываемых узлов трения двигателя по параметрам частиц, заключается, по сути, в установлении связи измеренных параметров с техническим состоянием двигателя. Считается, что такая связь обеспечивается за счет измерения в *пробе масла* следующих параметров: количества частиц, массовой доли элемента, распределения частиц изнашивания по размерам, их морфологии и элементного состава частиц.

Многолетний опыт оценки состояния сопряженных узлов трения авиационных ГТД по результатам анализа пробы масла показал следующее – достоверность диагностирования двигателей 30КП/КУ/КУ-154 в целом не превышала 7% [22-24], двигатели J52P408 (устанавливались на самолеты палубной авиации) отключались при полетах раз в месяц из-за разрушения подшипника 4½ [12].

С другой стороны, требования к достоверности диагностирования со стороны эксплуатантов растут при одновременном снижении стоимости жизненного цикла двигателя. Основными требованиями эксплуатантов являются:

- высокая достоверность оценки состояния двигателя на момент измерения;
- возможность прогнозирования остаточного ресурса двигателя в случае выявления повреждения в двигателе;
- возможность эксплуатации двигателя с повреждением при достоверном недопущении превышения критического развития повреждения;
- стоимость анализа (время и средства, затрачиваемые на отбор, доставку и подготовку проб, проведение анализа и принятия диагностического решения).

Процесс высокодостоверной оценки состояния двигателя начинается с отбора пробы. Понятно, что точка отбора пробы, технология отбора во многом определяют эффективность диагностирования. Никакая самая совершенная аппаратура не позволит поставить достоверный диагноз, если проба не будет нести достаточное количество информации об износных процессах в двигателе [2, 10]. После того как проба поступила на анализ необходимо аппаратное обеспечение, позволяющее извлечь максимальную информацию о параметрах частиц в отобранной пробе [25]. Для измеренных параметров должны быть найдены диагностические признаки, коррелирующие с техническим состоянием двигателя. Заключительный этап – алгоритм принятия диагностического решения.

1.1 Отбор пробы масла с коробки приводов и маслобака

В двигателе имеется несколько точек, позволяющих отобрать пробу масла на анализ. К ним относятся коробка приводов (КП), маслобак (МБ), контрольные элементы и маслофильтр, магнитные пробки (МП).

При этом поступающая на анализ проба масла должна отвечать определенным требованиям, которые позволяют обеспечивать высокую достоверность результатов диагностирования. Информационная ценность результатов анализа отобранной пробы зависит от:

- точки отбора пробы;
- распределения продуктов износа в точке отбора пробы (представительности пробы);
- конструкции заборного устройства;
- времени отбора пробы.

Рассмотрим выполнение сформулированных критериев при отборе пробы с указанных выше точек.

В работах [25-32] было показано, что при отборе пробы масла с КП в исправном двигателе массовая доля частиц изнашивания с наработкой не меняется. При возникновении повреждения массовая доля начинает возрастать. Поэтому КП изначально являлась основной точкой отбора масла на анализ.

Технология отбора пробы с коробки приводов следующая. Проба сливается не позднее 30 минут после останова двигателя, при этом первые 50 мл сливаются на противень, после чего отбирается проба на анализ в объеме 200-250 мл [27-29]. После озвучивания (перемешивания) из объема 250 мл отбирается и анализируется аналитическая навеска и по результатам анализа принимается диагностическое решение. Считается, что первые 50 мл не несут информации о процессах изнашивания в двигателе, поэтому эта часть пробы не подлежит анализу.

Маслосистема авиадвигателя устроена таким образом, что в коробку приводов поступает очищенное масло после маслофильтра и поэтому результаты анализа напрямую отвечают только за состояние валов, зубчатых колес и подшипников коробки приводов. Опыт использования спектрального анализа показал, что лишь в 5-7 % случаев от общего числа поврежденных двигателей результаты спектрального анализа по пробе масла позволяют выявить повреждения на ранней стадии развития [23].

Одной из причин отсутствия повышенного содержания металлической примеси при возникновении повреждения в пробе масла, слитой с коробки приводов, может являться механизм изнашивания узла [31-33].

Еще одной точкой отбора пробы, позволяющей оценить техническое состояние двигателя, является маслобак. Отбор пробы с маслобака может осуществляться с помощью специального пробоотборника, либо путем слива пробы через краник маслобака [6, 31, 34, 35].

При отборе пробы через краник маслобака в начале стравливается 0,5 литра масла, после чего отбирается проба в объеме 150-200 мл и поступает в лабораторию.

При способе отбора пробы с помощью заборного устройства с маслобака сразу возникают вопросы по величине погрешности, связанные с пробоотбором.

В работе [6], что при температуре масла в маслобаке 100-120°C через пять минут после останова двигателя частицы размером более 30 мкм окажутся на дне маслобака и не будут захвачены пробоотборником. Таким образом, уже на первом этапе пробоотбора большая часть информативных частиц будет отсутствовать в емкости, направленной в лабораторию на анализ.

На втором этапе из емкости с маслом объемом 150-200 мл отбирается аналитическая навеска для измерения массовой доли элементов на рентгенофлуоресцентном или атомно-эмиссионном анализаторе. При определении массовой доли на рентгенофлуоресцентном анализаторе аналитическая навеска, используемая для осаждения частиц на мембранный фильтр, составляет от 10 до 50 мл [4-6]. Необходимо отметить, что увеличение навески позволяет

концентрировать пробу на поверхности мембранного фильтра (снизить предел обнаружения), а с другой стороны, приводит к значительному увеличению времени осаждения частиц на мембрану. Как правило, объем аналитической навески 5 мл является достаточно представительным. Однако представительность пробы нарушается еще на первом этапе пробоотбора – наиболее информативные частицы не были отобраны с маслобака и, соответственно, не могли попасть в аналитическую навеску, что значительно искажает результат анализа и, соответственно, результат диагностирования.

При использовании атомно-эмиссионного метода с вращающимся электродом температура масла в ванночке с аналитической навеской достигает 120-150°C и в формировании аналитического сигнала участие принимают частицы микронного размера, более крупные частицы (более 5 мкм) моментально осаждаются на дно ванночки. Поскольку в атомно-эмиссионном анализе аналитический сигнал пропорционален испарившейся массе частиц, то при таком способе измерения всегда будет происходить занижение результатов измерения массовой доли относительно истинного значения, что приводит в недостаточной достоверности результатов диагностирования [33].

Таким образом, нормативные документы [27, 29] при отборе пробы масла с КП и маслобака не предусматривают анализ пробы первого слива. Обоснованность такого подхода вызывает сомнения. Необходимо доказательство, что при возникновении повреждения, независимо от его типа развития, вклад крупной фракции можно не учитывать при принятии диагностического решения. Таким доказательством могут являться исследования вида функций распределения частиц по размерам в исправных двигателях и в двигателях с повреждениями. Имеющиеся опубликованные сведения имеют ограниченный характер и требует дополнительного исследования [31, 36, 37].

1.1.1. Отбор пробы с контрольных элементов

Авиационные ГТД, независимо от компании-изготовителя, оснащены контрольными элементами (КЭ), к которым относятся магнитные пробки (МП) и различные типы фильтров-сигнализаторов (ФС). Срабатывание фильтров-сигнализаторов, как правило, приводит к выключению двигателя. Поэтому остановимся на рассмотрении информации о частицах изнашивания, снимаемых с магнитных пробок, которая позволяет, в некоторых случаях, предупредить разрушение узла.

Длительный опыт использования информации, накапливаемой на магнитных пробках, для выявления повреждения узлов и деталей, показал следующее.

Имелись случаи, когда на МП отсутствовали частицы, но двигатель отстранялся от эксплуатации по разрушению узла [2, 38, 39]. Чаще всего это связано с тем, что МП не улавливали частицы на основе меди, магния, алюминия и титана.

Опыт ОА «ОДК-Авиадвигатель» и Rolls-Royce показывает, что при использовании информации с магнитных пробок повреждение может быть обнаружено перед катастрофическим износом, во время повреждения или вообще может быть не обнаружено [2, 10, 40, 41]. Понятно, что в случаях при обнаружении стружки на МП информация с указанных выше приборов пригодна, в качестве первичной формы защиты двигателя. При этом роль информации с МП при планировании обслуживания двигателя минимальна [2, 40].

Таким образом, краткое изложение представленного материала позволяет сделать вывод, что контрольные элементы (МП, ФС, МСС) запаздывают с выявлением повреждения на ранней стадии развития и служат в качестве первичных признаков защиты двигателя от разрушения. Проблема выявления повреждения на ранней стадии развития при использовании информации на

контрольных элементах связана прежде всего, с недостаточной эффективностью улавливания МП ферромагнитных частиц и пропуском диамагнитных частиц.

1.1.2. Отбор частиц изнашивания, накопленных на основном маслофилт্রে

Последние годы исследователи и эксплуатанты все чаще обращают внимание на контроль состояния двигателя по параметрам стружки, накапливаемой на основном маслофилт্রে. Разработаны и внедрены ряд технологий диагностирования, учитывающих размер частиц, их химический состав и морфологию [42-45].

Преимущества использования данных по параметрам частиц, накапливаемых на маслофилт্রে, заключаются в следующем:

- пропускная способность маслофилтра позволяет всей рабочей жидкости проходить через маслофилтр; (Откуда пошла такая нумерация, начало прописные буквы)

- количество осевших частиц на маслофилт্রে значительно превышает количество частиц в рабочей жидкости и частиц, уловленных магнитными пробками филтрами-сигнализаторами;

- маслофилтр накапливает стружку всех типов (ферромагнетики, диамагнетики, лаки, шлам и т. д.).

В настоящее время единая технология диагностирования двигателя по результатам измерения параметров частиц, уловленных маслофилтром, отсутствует. Поэтому различные фирмы для диагностирования используют собственные разработки. Проблема заключается в поиске эффективных диагностических признаков, связывающих параметры частиц, накопленных на маслофилт্রে, с техническим состоянием двигателя.

Rolls-Royce производит анализ стружки с фильтроэлемента после того, как обнаружена стружка на магнитной пробке [10]. После этого фильтроэлемент снимается, разбирается, выделяется часть диагностического слоя и направляется на анализ. По изменению количества и размеров частиц с наработкой судят о техническом состоянии двигателя. Для идентификации типа сплава стружка может быть направлена на микрорентгеноспектральный анализ.

Подход, когда углубленная диагностика производится после обнаружения стружки на магнитных пробках не лишен недостатков. Например, по статистике АО «ОДК-Авиадвигатель» из 19 двигателей, где на магнитной пробке и фильтрах-сигнализаторах была обнаружена стружка, 9 двигателей были сняты с крыла сразу же, и как оказалось впоследствии, с серьезными разрушениями узлов [41]. Это является свидетельством недостаточной эффективности такого подхода, приводящего к увеличению ремонтных затрат.

Фирма Allied Signal для оценки технического состояния применяется спектрометрический анализ проб масла и анализ частиц, смытых с маслофильтра [43]. Здесь периодичность отбора проб регламентирована – 50 часов для новых двигателей, 100 часов для двигателей, прошедших период приработки.

Достоверность оценки технического состояния двигателей при таком подходе разработчик Allied Signal не приводит.

Фирма GasTOPS решила задачу оценки проблемного подшипника 4½" двигателя J52P408 с помощью фильтрационного анализа, описанного в работе [2].

Найденные диагностические признаки, позволили обнаруживать повреждение подшипника на ранней стадии развития. Такими признаками стало обнаружение на фильтрующем слое комбинаций частиц Fe и Cr, Fe и Mo, Fe и Ag являющимися индикаторами повреждения деталей из стали М-50. За счет этого вовремя обнаружено повреждение в двигателях 58 самолетов. Достоверность результатов диагностики по выявлению повреждения подшипника 4½" составила 95 % [44, 45]. Сведения о выявлении повреждения других узлов двигателя отсутствуют.

Современные фильтроэлементы с тонкостью фильтрации 15-30 мкм являются одноразовыми и имеют ресурс от 600 и более часов. Понятно, что при отборе частиц на анализ с интервалом 600 часов наработки начало и развитие повреждения может быть пропущено. Вероятнее всего, в связи с повышенным интересом эксплуатантов к фильтрационному анализу фирма Pall разработала систему диагностического фильтра, состоящую из диагностического фильтроэлемента со съемным диагностическим слоем [46]. Диагностический слой (диагностическая лента) разделен посередине на две части, которые могут быть последовательно извлечены и использованы для получения и анализа пробы смыва (рисунок 1.1).

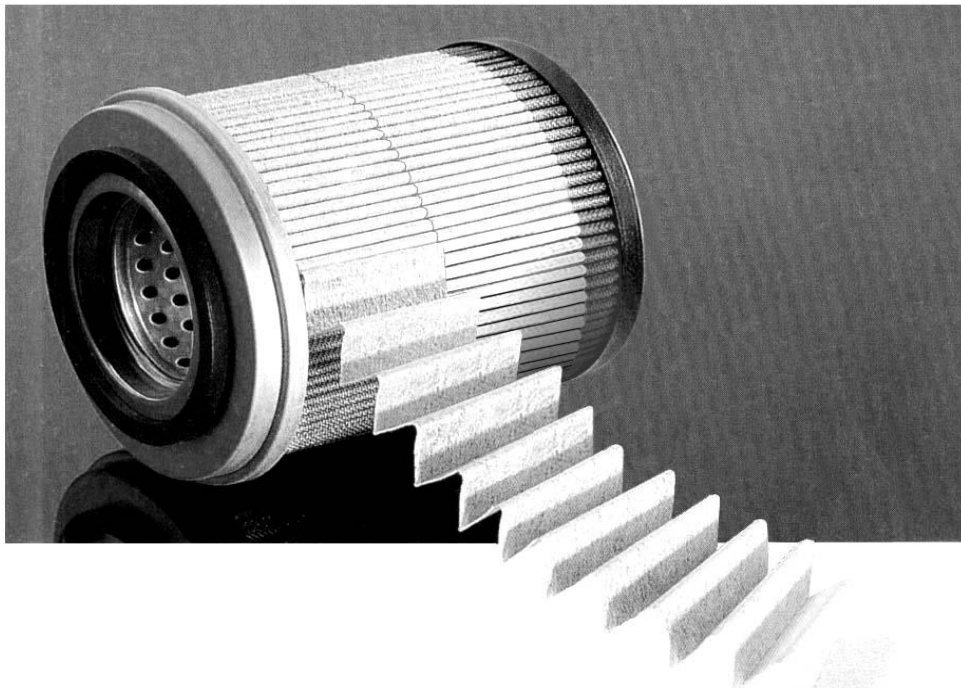


Рисунок 1.1 – Фильтроэлемент Pall QA07930-01 с диагностическим слоем Dirt Alert, разделенным на две части

После использования лент промывается непосредственно фильтроэлемент и анализируется смыв. Таким образом периодичность отбора смыва на анализ может быть сокращена до 200 часов без замены фильтроэлемента, соответственно уменьшается вероятность пропуска повреждения [46].

Другой подход и другой метод измерения параметров частиц изнашивания использован в работах [47, 48].

Для получения смыва с диагностической ленты фильтроэлемента QA-07930-01 было разработано специальное лентопротяжное устройство (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Устройство для получения пробы смыва с диагностической ленты

Диагностическая лента наматывается на катушку, протягивается по корпусу устройства и закрепляется на второй катушке. Устройство помещается в ультразвуковую ванну, предварительно на 2/3 заполненную нефрасом. После включения электродвигателя лента с одной катушки перематывается на другую и за счет кавитационных явлений частицы износа переходят с диагностической ленты в жидкость, которая поступает на анализ.

В соответствии с решением [49], десять двигателей ПС-90А, находящихся в эксплуатации, были оснащены фильтроэлементом с диагностическим слоем, который был разделен по высоте на две части (верхнюю и нижнюю диагностические ленты). Для исследования параметров частиц, накапливаемых на ленте для усиления эффекта, преднамеренно был выбран интервал отбора проб (снятие лент) через 300 ± 50 часов. При очередном техническом обслуживании, при наработке ленты 300 часов, снималась с фильтроэлемента верхняя диагностическая лента и после обработки направлялась в лабораторию на анализ. Через 600 часов снималась нижняя диагностическая лента, а после 900-1000 часов наработки снимался сам фильтр и анализировался смыв с фильтра.

Выяснено, что при измерении параметров частиц с диагностической ленты представительным является первый смыв, по результатам анализа которого может приниматься диагностическое решение.

Результаты проведенных исследований показали отсутствие превышений параметров частиц изнашивания, смытых с диагностического слоя относительно параметров частиц статмодели, представленных в работе [48]. Это означает, что разработанная статистическая модель для фильтроэлемента без диагностического слоя может быть применена в случаях, когда в двигателях используется фильтроэлемент с диагностическим слоем.

Таким образом, из представленного материала следует:

— разделение диагностического слоя на две ленты позволяет проводить диагностирование авиадвигателя ПС-90А без замены основного маслофильтра при регламенте обслуживания каждые 200-300 часов.

— установлено, что для оценки технического состояния маслосистемы авиадвигателя по результатам СВЧ плазменных измерений можно использовать первый смыв с диагностической ленты фильтроэлемента QA-07930-01.

— для диагностирования авиадвигателя ПС-90А, оснащенного фильтроэлементом QA-07930-01 с диагностическим слоем, возможно использование ранее разработанной статистической модели для фильтроэлемента QA-07930 без диагностического слоя.

1.2 Диагностические параметры, позволяющие выявлять повреждения в ГТД по результатам анализа пробы масла

Традиционно оценка технического состояния узлов трения производится путем измерения величины массовой доли элемента в пробе масла. Согласно

методике диагностирования, при отсутствии повреждений узлов трения массовая доля элементов не меняется с наработкой двигателя, а при возникновении и развитии повреждения массовая доля элементов, входящих в состав сплавов поврежденных деталей, возрастает [32, 33, 50]. При достижении некоего наперед определенного значения (порога) массовой доли принимается диагностическое решение о возможности его дальнейшей эксплуатации [27, 51, 52].

Практика использования атомно-эмиссионного метода с подачей пробы масла в разряд вращающимся электродом показала, что при диагностировании двигателя J52P408 с интервалом отбора проб через 10 часов результаты анализа масла не предупреждают развития повреждения [11, 44].

В свою очередь, длительный опыт эксплуатации данного атомно-эмиссионного метода при оценке технического состояния узлов маслосистем двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 показал, что при отборе пробы масла на анализ через 50 часов достоверность выявления повреждения на ранней стадии развития не превысила 5-7 % [23, 24, 33]. Очевидно, что такая величина достоверности для коммерческих двигателей при оценке их технического состояния, непосредственно влияющего на безопасность полетов, недостаточна.

Считается, что диагностирование двигателей атомно-эмиссионным методом эффективно в случаях, когда размер частиц не превышает 8-10 мкм [11]. В работах [13, 33] показано, что в исправных двигателях размер частиц находится в диапазоне от долей мкм до 3 мкм. Казалось бы, в такой ситуации промахи в диагностике должны отсутствовать. Дальнейшие исследования [39, 53, 54] показали следующее:

—в пробе масла исправных двигателей могут находиться частицы размером намного больше 10 мкм.

—атомно-эмиссионный метод при определении содержания чрезвычайно чувствителен к изменению размеров частиц, т.е. функции распределения частиц по размерам. Изменение среднего размера в диапазоне 5-20 мкм может давать погрешность до 300% при определении содержания [33, 37].

Тем не менее, при некоторых типах повреждений спектральные методы показывают высокую достоверность диагностирования. Это подтверждается следующими фактами.

Так, использование атомно-эмиссионного метода с подачей пробы масла в разряд вращающимся электродом, при оценке повреждения среднего подшипника компрессора и подшипника ТВД двигателя АЛ-7Ф-1, позволило выявлять повреждение на ранней стадии развития, довести двигатель до предотказного состояния и получить достоверность диагностирования 92 % [55]. При этом было спасено более 280 двигателей.

Приведенный пример свидетельствует о том, что массовая доля элементов может являться эффективным диагностическим параметром только при определенных условиях. В работе [56] показано, что одним из условий является неизменность функции распределения частиц по размерам при возникновении и развитии повреждения.

Эффективность оценки технического состояния двигателя по результатам анализа пробы масла с КП и маслобака дополнительно во многом определяется тонкостью фильтрации основного маслофильтра. В двигателях Д-30КП/КУ/КУ154 устанавливается МФС-30 с тонкостью фильтрации 75 мкм (с 2009 года устанавливается 40 мкм маслофильтр) и при некоторых типах изнашивания возможно выявление поврежденных деталей КП и трансмиссионной части двигателя. В современных двигателях, использующих фильтры Pall тонкостью фильтрации 15 мкм, по сведениям, представленным в работе [57-58], повреждения с помощью анализаторов SpectroSCAN и ПРИЗМа не обнаруживаются. В работе [58] показано, что контроль технического состояния поверхностей трения методом спектрального анализа по результатам измерения параметров частиц изнашивания эффективен при условии попадания измеряемых значений содержания металлической примеси в рабочий диапазон используемого оборудования с пределом обнаружения менее 0,1 г/т. Таким образом, величину равновесного содержания металлической примеси в маслосистеме двигателя во многом определяют параметры маслофильтра. Вопрос влияния тонкости фильтрации масла

на величину массовой доли в пробе масла недостаточно изучен и требует дальнейших исследований. Ранее вопросу связи тонкости фильтрации основного маслофильтра и достоверности проводимой оценки технического состояния двигателя не уделялось достаточного внимания.

В работах [31, 32, 39] показано, что большинство повреждений характеризуется четырьмя диагностическими параметрами. В таблице 1 показана взаимосвязь между измеряемыми параметрами частиц изнашивания и характеристиками износного процесса [39].

Таблица 1.1 – Взаимосвязь между параметрами частиц изнашивания и достоверностью диагностирования

Параметры частиц изнашивания	Характеристика износного процесса			
	Величина износа	Скорость износа	Тип изнашивания	Местоположение
Массовая доля (содержание)	X	X		
Размер	X	X	X	
Морфология	X		X	X
Состав				X

Из таблицы 1.1 видно, что наиболее действенным параметром, позволяющим оценивать величину износа, его тип и скорость развития, является размер частиц.

Оценим возможность использования параметра «размер частиц» для диагностирования авиационных двигателей.

В работе [39] изучалось влияние размеров частиц, отвечающих за повышенный износ и сделан вывод, что частицы размером более 15 мкм характеризуют повышенный износ. Однако это заключение противоречит выводам [59], полученным при исследовании износных процессов зубчатых колес и подшипников с помощью датчика MetalScan, который в исправных агрегатах обнаруживал частицы размером более 125 мкм. Такой вывод подтверждается и рядом других исследователей [54, 60-62].

В частности, достаточно крупные частицы изнашивания были обнаружены при разработке и изготовлении государственного стандартного образца (ГСО) на основе натуральных частиц изнашивания, отобранных с исправных двигателей ПС-90А. В процессе подготовки ГСО было выяснено, что диапазон размеров частиц в этих двигателях составлял от долей мкм до 150 мкм [54, 55]. Это свидетельствует,

что ориентироваться при выявлении повреждения в двигателе только на размер частиц достаточно рискованно. В этом случае, согласно таблице 1.1, дополнительными диагностическими параметрами остаются величина массовой доли и морфология частиц.

В работах [32, 42, 63] представлены сведения по размерам и морфологии частиц, образовавшихся при пяти различных типах износа (трение, резание, усталостный износ, комбинированный износ (качение + скольжение) и скольжение).

Параметры частиц пяти типов износа указаны в таблице 1.2. При нормальном износе скольжения генерируются частицы пластинчатой формы, размером 0,5-15 мкм и толщиной 0,15-1 мкм. При резании выделяются частицы длиной 25-100 мкм и шириной 2-5 мкм.

Усталостный износ происходит при прерывистом трении качения (например, в подшипниках) с образованием «блочных» частиц изнашивания. Размер частиц составляет 10-100 мкм, а отношение между длиной и толщиной составляет 10:1. Дополнительным признаком усталостного износа являются сферические частицы блестящего вида размером до 5 мкм.

Комбинированный износ качения и скольжения обычно происходит на поверхностях зубьев шестерней, а отношение диаметра к толщине частиц составляет от 4:1 до 10:1 в зависимости от эвольвентного профиля шестерни. При проявлении этого типа износа чаще встречаются частицы размеров до 500-700 мкм.

Нагруженное трение происходит в паре трения с высокой нагрузкой и низкой скоростью движения деталей, в течение которого отделяются частицы более 15 мкм с отношением диаметра к толщине 10:1.

Таблица 1.2 – Параметры частиц изнашивания в зависимости от типов износных процессов

Тип износа	Параметры частиц			
	Размер, мкм	Толщина, мкм	Соотношение размеров сторон, мкм	Морфология
Трение	0,5-15	0,15-1	3:1-10:1	Мелкая пластинчатая стружка
Резание	25-100	2-5	12:1-20:1	Стружка
Усталостный износ	10-100	1-10	10:1	Пластинчатые чешуйки; Сферические частицы (до 5 мкм)
Комбинированный износ (качение+скольжение)			4:1-10:1	Сложная
Скольжение	>15		10:1	Сложная

Таблица 1.2 показывает, что диапазон размеров частиц может перекрываться между различными типами изнашивания. Возникает сложная задача определения типа изнашивания, связывая его с размером частиц. Более того, не всегда помогают и данные по морфологии для установления серьезности повреждения. Так, в работе [64] показано, что одним из диагностических признаков выкрашивания поверхностей подшипников является обнаружение с помощью феррографического анализа сферических частиц размером до 5 мкм. Однако имелся случай, когда при комиссионных испытаниях двигателя Д-30КП обнаруживались металлические сферические частицы размером до 5 мкм [65]. По результатам разборки двигателя очагов выкрашивания не было обнаружено. Двигатель был отправлен в эксплуатацию и выработал назначенный ресурс. Таким образом, морфологические признаки также не всегда помогают выявить поврежденный узел.

Из четырех представленных в таблице 1 диагностических параметров три (размер частиц, морфология, массовая доля) эффективны только когда превалирует один тип изнашивания. В других случаях достаточно сложно принять достоверное диагностическое решение, поскольку различные типы износа могут перекрываться между собой.

Четвертый параметр (элементный состав частицы изнашивания) указывает, согласно [39] только на поврежденный узел и не служит признаком повышенного износа.

Вследствие сложных взаимодействий между наложением одного типа износа на другой и морфологией, проблема принятия диагностического решения и численной оценки износа остается открытой.

Таким образом, представленный материал позволяет сделать несколько выводов:

— параметр «массовая доля» может показывать достоверные результаты диагностирования лишь для отдельных типов развития повреждений, когда функция распределения частиц по размерам не меняется с развитием повреждения;

— ориентироваться при оценке технического состояния двигателя только на размер частиц проблематично, поскольку, по литературным сведениям, повреждение может возникать при размерах частиц порядка 20 мкм и отсутствовать при размерах частиц более 150 мкм. Данный вопрос дискуссионный и требует дальнейшего изучения;

— одновременный учет при диагностировании по результатам анализа пробы масла параметров «массовая доля», «размер частиц» и «морфология» не облегчает принятия достоверного диагностического решения, поскольку повреждение может характеризоваться несколькими типами изнашивания и потому сложно выявить превалирующий тип изнашивания;

— должны быть найдены дополнительные диагностические параметры, характеризующие повышенный износ деталей и узлов двигателя по результатам анализа пробы масла.

1.3. Диагностические параметры при анализе пробы смыва с маслофильтра/фильтроэлемента СВЧ плазменным методом

Использование абсолютных параметров для пробы смыва с маслофильтра практически не применимо, поскольку они зависят от большого числа факторов, которые сложно учесть в условиях эксплуатации: времени работы фильтра, условия эксплуатации, качество приготовления пробы смыва, степень его конечного разбавления и т.д.

В работе [16, 18] было предложено в качестве признака наличия износного процесса использовать параметр $V_{\text{общ}}$ – отношение количества «сложных» частиц, состоящих из двух и более элементов к количеству «простых» частиц износа, состоящих из одного элемента, которое являлось индикатором общего технического состояния двигателя. Чем меньше данный параметр, тем лучше состояние трущихся поверхностей деталей двигателя и, наоборот, увеличение данного параметра свидетельствовало о повышенном износе деталей двигателя. Используя дополнительный параметр $V_{\text{элемент}}$ (отношение количества «сложных» частиц к количеству «простых» для определенного элемента) можно более детально определить тип элемента, ответственного за повышение $V_{\text{общ}}$, и тем самым обратить внимание на сложные частицы, содержащие данный элемент [16, 18]. Применение $V_{\text{общ}}$ в качестве диагностического параметра позволило более точно определить изнашиваемый агрегат двигателя. При этом, вопросы использования количества частиц в качестве диагностического параметра, регистрации «простых» частиц не исследовались и не обсуждались.

Был найден дополнительный диагностический параметр, коррелирующий с техническим состоянием авиадвигателя $R_{\text{сл}}$ – доля количества «сложных» частиц изнашивания определённого состава в общем количестве частиц изнашивания (доля «сложных» частиц определённого состава, например, Cu-Ag, Fe-Cr-Ni и т.д.) [16, 18].

Для расчета $R_{сл}$ использовали рейтинговый подход. Рейтинг частиц износа рассчитывали в виде количества частиц определенного сорта, приходящихся на 1000 частиц износа. Тем самым устранялось влияние времени накопления частиц на фильтре, степени разбавления пробы и т. д.

Очевидно, что погрешность рейтинга тем ниже, чем больше зарегистрировано частиц износа. В пробах масла с двигателей, характеризующихся нормальным износом, количество частиц не очень велико, порядка нескольких сотен, и погрешность определения рейтинга велика. В то время, как в смывах масляных фильтров количество частиц износа достаточно большое, чтобы погрешность определения рейтинга была минимальна.

Опорные значения рейтинга частиц износа, полученные из смывов двигателей, характеризующихся нормальным износом, позволяют получить статистическую эталонную картину износа исправного двигателя [48, 56].

Для построения модели исправного эталонного двигателя необходимы усредненные результаты опорных параметров большого числа двигателей, гарантированно характеризующихся нормальным типом изнашивания [26, 33].

Выводы по главе 1

В главе предпринята попытка оценки влияния различных факторов на достоверность принятия диагностического решения от точки отбора пробы с двигателя до используемых диагностических параметров, связывающих величину параметров с техническим состоянием узлов и деталей, омываемых смазочным маслом.

1. Технология отбора пробы с коробки приводов и маслобака не предусматривает анализ пробы первых нескольких десятков миллилитров слитого

масла, которые содержат крупные частицы. Неучет крупных частиц может являться одной из причин недостаточной достоверности результатов диагностики.

Для обоснования использования такой технологии требуется доказательство, что массовая доля металлической примеси повышается во всех разноразмерных фракциях при развитии повреждения. В этом случае, действительно, имеется возможность оценки технического состояния двигателя по мелкой фракции. В периодической литературе такое доказательство не приводится и не обсуждается.

Для выяснения данного вопроса необходимо получить сведения по функциям распределения частиц по размерам для исправных и поврежденных двигателей. Изучения функции распределения частиц в исправных двигателях и двигателях с повреждениями представляет интерес еще и потому, что в литературных источниках до сих пор содержится информация, что в исправных двигателях размер частиц не превышает 3-5 мкм, что противоречит последним экспериментальным данным.

2. Имеющиеся экспериментальные результаты о влиянии тонкости фильтрации на величину массовой доли не полные и противоречивые. Часть исследователей считает, что при использовании 15 мкм фильтров повреждения анализаторами не обнаруживаются, другие исследователи считают возможным использование традиционной аппаратуры (БАРС-3, ПРИЗМА, Спектроскан, Spectroil и т. д.) при оценке технического состояния по результатам анализа пробы масла. В этой связи необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований по влиянию типа изнашивания и тонкости фильтрации масла на величину массовой доли при анализе пробы масла, выработке требований к измерительной аппаратуре.

3. Перспективным направлением для повышения достоверности результатов диагностики является оценка состояния двигателя по параметрам частиц изнашивания, накопленных на маслофильтре (фильтроэлементе). Для современных двигателей разработана система диагностического фильтра, включающего диагностический фильтроэлемент со съемным диагностическим слоем. Съемный слой позволяет в принципиальном плане производить отбор

пробы смыва через необходимые промежутки времени без замены фильтроэлемента.

4. При использовании в конструкции маслосистемы ГТД маслофильтра с тонкостью фильтрации 75 мкм, необходим отбор пробы масла из коробки приводов и отбор пробы смыва с маслофильтра. При такой тонкости фильтрации проба масла, как правило, отвечает за техсостояние коробки приводов, проба смыва за состояние трансмиссионной части двигателя.

При использовании современных фильтроэлементов с ячейками 15 мкм для общей оценки технического состояния двигателей возможно использование только пробы смыва с маслофильтра (фильтроэлемента). Но поскольку в трансмиссионной части двигателя и коробке приводов могут встречаться одинаковые сплавы, то в отдельных случаях для уточнения поврежденного узла дополнительно анализируется проба масла с коробки приводов.

5. При СВЧ плазменных измерениях эмпирическим путем найдено несколько новых эффективных диагностических параметров. Однако вопрос правильности измерения данных параметров и влияния их на достоверность диагностирования не обсуждается.

В частности, в опубликованных работах не обсуждается природа образования «простых» частиц, которая может быть связана с механизмом взаимодействия изнашиваемых поверхностей, размером частиц, недостаточным пределом обнаружения СВЧ плазменного комплекса и т. д. Ровно также отсутствуют сведения по интерпретации природы образования элементного состава «сложных» частиц, не соответствующих ни одному из типов сплавов, применяемых в конструкции двигателя.

Для выяснения данных вопросов необходимо проведение ряда специальных экспериментальных исследований на искусственно приготовленных и натуральных частицах изнашивания, отобранных с маслосистемы двигателя.

Обзор состояния проблемы диагностирования узлов трения, омываемых маслом, авиационных ГТД показал, что для получения высокодостоверных диагностических результатов перспективным является использование СВЧ

плазменного метода. Резервы повышения диагностических возможностей данного метода имеются и они связаны с решением следующим задач:

1. Оценить влияние тонкости фильтрации маслофильтра (фильтроэлемента) на параметры частиц изнашивания, находящихся в масле и уловленных маслофильтром при стационарном и импульсном поступлении частиц в маслосистему двигателя;
2. Оценить распределения частиц по размерам в двигателях с разным техническим состоянием;
3. Оценить правильность определения элементного состава частиц изнашивания при СВЧ плазменных измерениях;
4. Объяснить причину регистрации одноэлементных частиц;
5. Оценить зависимость числа зарегистрированных многоэлементных частиц от технического состояния двигателя;
6. Разработать методику диагностирования авиационных ГТД на основе результатов СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла и смыва с маслофильтра (фильтроэлемента).

Глава 2. Математическое моделирование процессов развития повреждений деталей и сборочных единиц, работающих в масле

В течение последних 15 лет в конструкцию авиационных ГТД активно внедряются фильтры тонкой очистки. На смену фильтрам МФС-30 с тонкостью фильтрации 75 мкм пришли фильтры МФС-94 с ячейками 40 мкм, а затем 15 мкм фильтры Pall. За счет повышения степени очистки масла удалось существенно снизить количество продуктов загрязнения и изнашивания, циркулирующих по маслосистеме ГТД [68]. 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 [57, 69, 70].

Следствием внедрения тонкоячеистых фильтров стало снижение диагностической ценности проб масел, отбираемых с КП и МБ. При тонкости фильтрации 15 мкм и среднем размере частиц изнашивания 5-15 мкм на фильтроэлементе осаждается основная масса частиц [68]. Поэтому массовая доля частиц изнашивания, циркулирующих в системе смазки, находится на границе предела обнаружения большинства спектральных методов, который составляет порядка 0,1 г/т [71-74].

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.

В качестве исходных данных для моделирования использованы экспериментально полученные распределения частиц по размерам для исправного двигателя и двигателей с повреждениями. Рассматривались случаи постепенного развития повреждения и импульсного вброса частиц в маслосистему двигателя.

Для понимания влияния точки отбора пробы на эффективность диагностирования в зависимости от параметров частиц и типа маслофильтра на рисунке 2.1 приведена упрощенная принципиальная схема маслосистемы авиадвигателя (рисунок 2.1), которая содержит его основные узлы и механизмы. Согласно данной схеме, масло откачивается из маслобака маслососом и под давлением подается на трущиеся узлы двигателя, где происходит генерация частиц износа. На маслофилт্রে часть частиц износа задерживается, а часть проходит дальше в маслосистему. Для оценки влияния размеров ячеек фильтра на распределение примеси были выбраны две точки отбора диагностического материала: проба масла с коробки приводов (КП) и смыв частиц изнашивания с основного маслофильтра (фильтроэлемента).

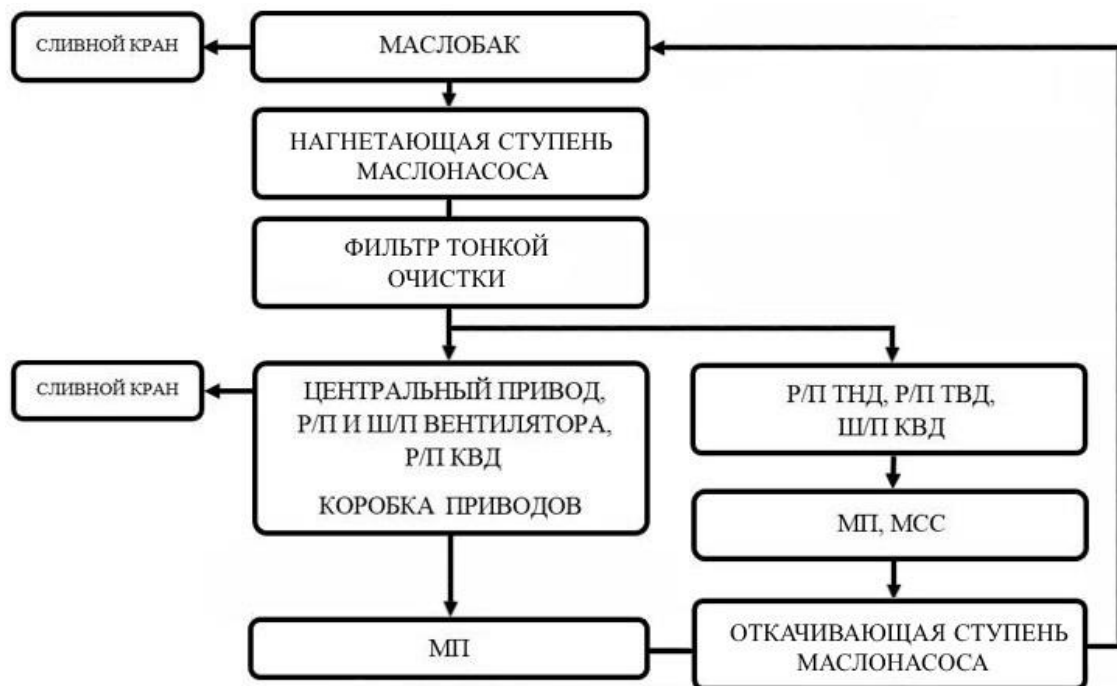


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема маслосистемы авиационного двигателя

2.1. Исходные данные для моделирования.

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.

Для полученных распределений были определены законы распределения, среднее и дисперсия значений размеров частиц. Параметры распределений по четырем выбранным двигателям приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Используемые данные для проведения численного эксперимента

№	Модель	№	Примечание	Наработка ППР	D_μ	D_σ	N_{gist}	D_{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_μ , D_σ - параметры логнормального распределения, N_{gist} - количество классов, D_{max} - максимальный размер частиц.

Исследуемые двигатели характеризуются объемом прокачиваемого масла $V_{\text{масла}} = 40$ л, скоростью прокачки через фильтр $S_{\text{прокачки}} = 40$ л/мин, плотностью масла $\rho_{\text{масла}} = 0,875$ г/см³ при 20°C.

Для исследования процессов изменения параметров металлической примеси в маслосистеме использовался статистический метод имитационного моделирования Монте-Карло [75]. Процесс генерации частиц износа описывался функцией распределения по размерам, имеющей логнормальный вид. Данный статистический закон распределения дискретной примеси подтверждается многочисленными исследователями и экспериментальными данными [76, 77].

$$P(D, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma D} e^{-\left(\frac{(\ln(D)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

$$\sigma = \ln(D_\sigma)$$

$$\mu = \ln(D_\mu)$$
(1)

где D – размер частиц, σ – среднеквадратичное отклонение, μ – средний логарифм размера частиц

Используя генератор случайных чисел, генерирующий размеры частиц в соответствии с формой логнормального распределения с заданными параметрами (D_μ , D_σ , N_{gist} , D_{max}), получали набор частиц, суммарная масса которых в заданном объеме масла давала заданную величину массовой доли [78].

На рисунке 2.2, в качестве примера приведены исходные данные для моделирования процесса изменения параметров металлической примеси в маслосистеме, где в объеме масла $V_{\text{масла}}=40$ л при заданной величине массовой доли $C=0,1$ г/т генератор случайных чисел сгенерировал набор частиц железа в количестве $N=10578$ массой $M_e=3501,3$ мкг в соответствии с логнормальным распределением с параметрами $D_\mu = 24,26$ мкм, $D_\sigma = 2,66$ мкм, $N_{\text{gist}} = 50$, $D_{\text{max}} = 100$.

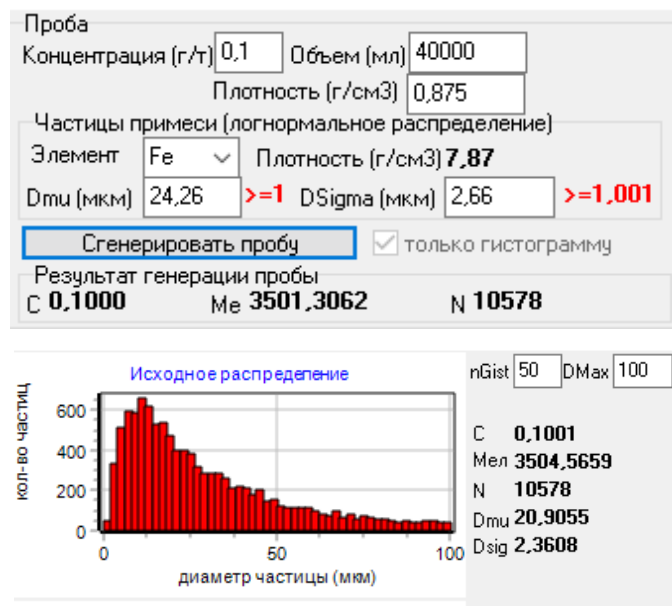
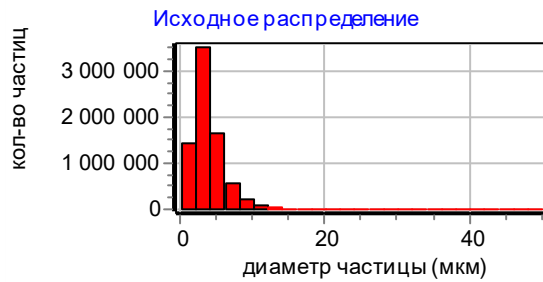
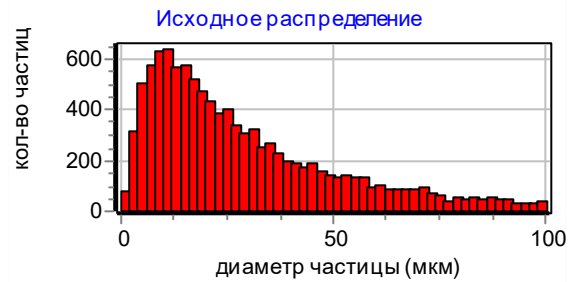


Рисунок 2.2 – Пример исходных данных для моделирования процесса изменения параметров металлической примеси в маслосистеме

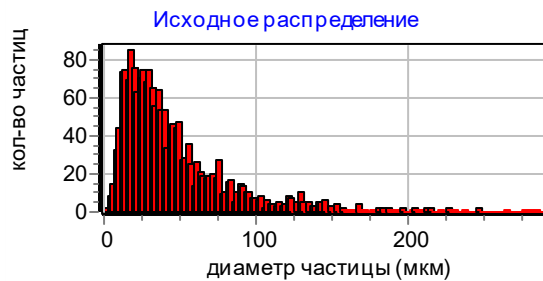
На рисунке 2.3. приведены экспериментально полученные диаграммы распределения частиц по размерам для четырех реальных двигателей, показанных в таблице 2.1.



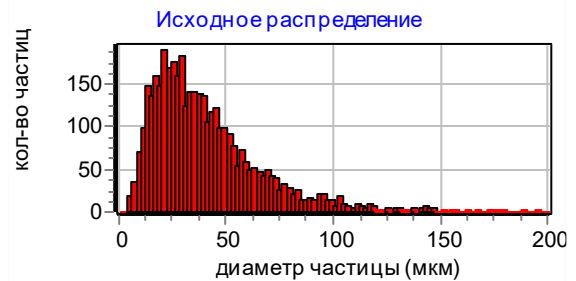
а) $D_{\mu} = 3,2 \text{ мкм}$, $D_{\sigma} = 1,7 \text{ мкм}$,
 $N_{\text{gist}} = 25$, $D_{\text{max}} = 50 \text{ мкм}$



б) $D_{\mu} = 24,26 \text{ мкм}$, $D_{\sigma} = 2,66 \text{ мкм}$,
 $N_{\text{gist}} = 50$, $D_{\text{max}} = 100 \text{ мкм}$



в) $D_{\mu} = 34,33 \text{ мкм}$, $D_{\sigma} = 2,2 \text{ мкм}$,
 $N_{\text{gist}} = 145$, $D_{\text{max}} = 290 \text{ мкм}$



г) $D_{\mu} = 34,46 \text{ мкм}$, $D_{\sigma} = 1,93 \text{ мкм}$,
 $N_{\text{gist}} = 100$, $D_{\text{max}} = 200 \text{ мкм}$

Рисунок 2.3 – Исходные распределения частиц изнашивания по размерам

Понятно, что размер частиц, циркулирующих в маслосистеме двигателя, во многом определяются параметрами маслофильтра. Для описания процессов, происходящих при прохождении через фильтр масла с частицами износа, использована следующая статистическая модель фильтра. Суть ее в следующем: каждая частица износа с некоторой вероятностью либо пройдет через фильтр, либо осядет на нем. Это связано с неравномерностью распределения ячеек фильтра по размерам, разной формой частиц износа, гидродинамикой течения масла и многими другими причинами. Из статистики известно, что при одновременном действии множества различных случайных процессов результирующий процесс приближается к распределению вероятности по закону Гаусса. Таким образом, вероятность прохождения каждой частицы через фильтр будет определяться следующим выражением [75]:

$$F(D, D_\mu^\phi, D_\sigma^\phi) = 1 - \int_{-\infty}^D \frac{1}{\sqrt{2\pi}D_\sigma^\phi} e^{-\left(\frac{x-D_\mu^\phi}{D_\sigma^\phi}\right)^2} dx \quad (2)$$

где D_μ^ϕ - средний диаметр ячеек фильтра, а $(D_\sigma^\phi)^2$ - их дисперсия.

Для значений параметров масляных фильтров ($D_\mu^\phi = 40$ мкм, $D_\sigma^\phi = 1,5$ мкм; $D_\mu^\phi = 75$ мкм, $D_\sigma^\phi = 1,5$ мкм), приведены их передаточные функции на рисунке 2.4.

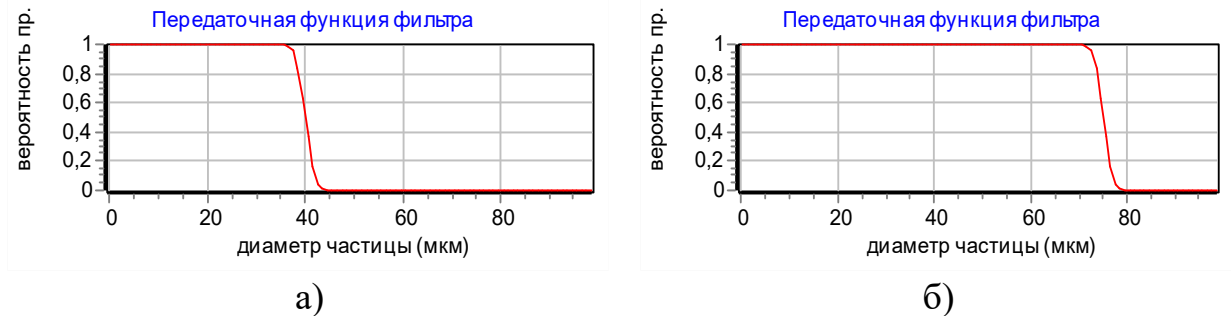


Рисунок 2.4 – Передаточная функция фильтра: а) при $D_\mu^\phi = 40$ мкм, $D_\sigma^\phi = 1,5$ мкм; б) при $D_\mu^\phi = 75$ мкм, $D_\sigma^\phi = 1,5$ мкм.

Из рисунка 2.4 видно, что при заданной передаточной функции для 40 мкм фильтра частица размером менее 35 мкм с вероятностью близкой к 100% преодолет фильтр, частица размером 40 мкм пройдет через фильтр с вероятностью 50%, а все частицы более 45 мкм будут уловлены фильтром.

На рисунке 2.5 показано распределение в масле и на фильтре набора частиц изнашивания (рисунок 2.3, б)) при прохождении через 40 мкм фильтр в течение 60 минут с исходной массовой долей $C=0,1$ г/т.

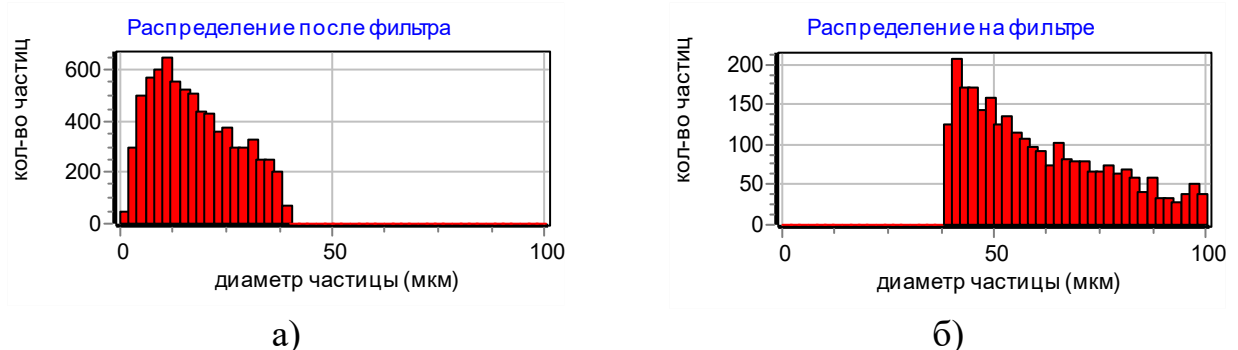


Рисунок 2.5 – Распределение частиц износа после фильтрации в течение 60 минут: а) распределение частиц в масле (после фильтра); б) распределение частиц на фильтре

В реальной ситуации проба прокачивается через маслофильтр со скоростью 40 л/мин и за 1 час весь объем масла пройдет через фильтр 60 раз. На рисунке 2.6 показаны изменения параметров частиц изнашивания в масле и на фильтре в процессе часовой фильтрации набора частиц (рисунок 2.3, б)) с исходным содержанием примеси $C=1$ г/т.

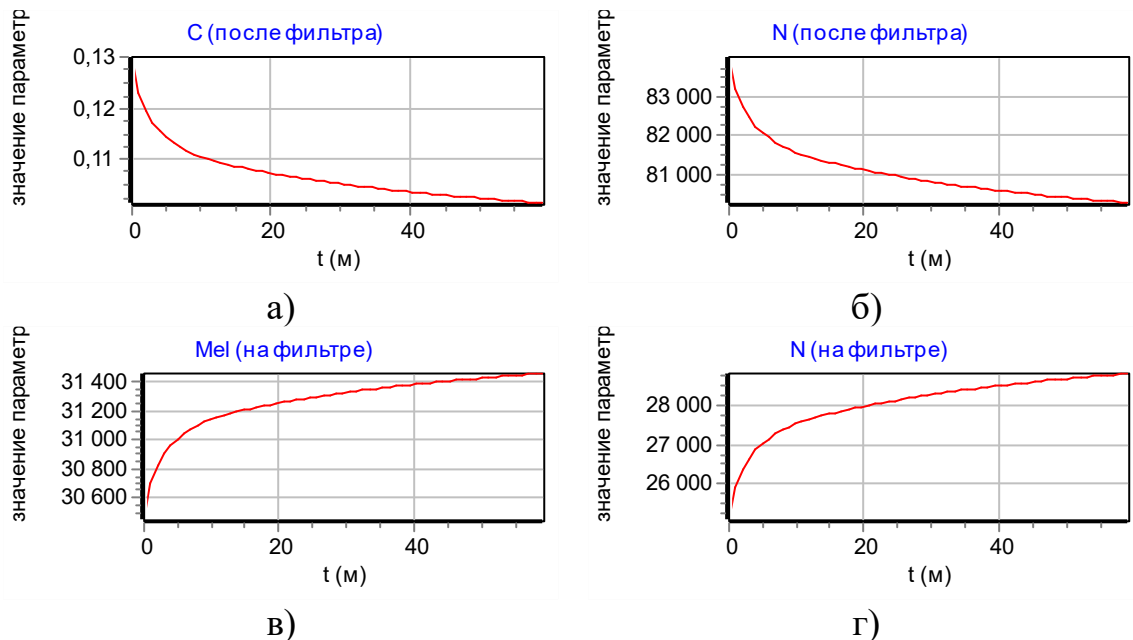


Рисунок 2.6 – Временные зависимости параметров металлической примеси после 60-минутной фильтрации, где: а) изменение массовой доли (C , г/т) в масле; б) изменение количества частиц (N , шт) в масле; в) изменение массы металлической примеси M_{el} (далее – $M_{эле\text{м}}$, мкг) на фильтре; г) изменение количества частиц (N , шт) на фильтре

По результатам проведенной работы получены практические и экспериментальные данные для создания математической модели маслосистемы. При моделировании источника генерации частиц в маслосистему определены параметры распределений частиц в пробах смывов с маслофильтров двигателей с различным техническим состоянием (исправный, с повреждением). Для создания математической модели маслофильтра (функции источника осаждения частиц) определены параметры маслофильтров, применяемых в конструкции двигателей Д-30КП/КП-2/КУ (МФС-30, МФС-94). Параметры масла, объема маслосистемы, скорости прокачки и временная функция, позволили провести моделирование

различных износных процессов, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Таким образом, разработан инструмент для математического моделирования износных процессов, протекающих в маслосистеме авиационного ГТД в условиях, приближенных к реальным. Программа позволяет гибко изменять параметры маслосистемы и исходные параметры металлической примеси, передаточную функцию фильтра и исследовать износные процессы для определения возможности выявления повреждений узлов двигателя на различных этапах его жизненного цикла.

2.2. Моделирование процессов фильтрации металлической примеси при нормальном изнашивании

Одной из задач данного исследования являлась оценка численных параметров генерации металлической примеси, характерных для исправного двигателя и двигателя с повышенным износом. 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 процесса генерации проводилось для частиц железа в соответствии с экспериментально полученными распределениями каждого из четырех двигателей, показанных в таблице 2.1.

Граничные значения исправного двигателя по железу приведены в таблице 2.2 [79].

Таблица 2.2. Фрагмент статистической модели исправного двигателя Д-30/КП/КП-2/КУ по граничным значениям «массовая доля» для частиц железа C_{Fe}

Наработка, ч	Уровень граничных значений, C_{Fe} , г/т		
	$\bar{X}$ среднее	$\bar{x} + 2\sigma$	$\bar{x} + 3\sigma$
1-500	0,86	6,13	22,51
500-1000	0,25	1,55	5,2
1000-2000	0,22	1,01	3,11
2000-3000	0,21	1,15	3,57
3000-10000	0,21	1,37	4,62

В таблице 2.3 приведены результаты моделирования процесса генерации примеси в соответствии с распределением каждого из четырех двигателей (таблица 2.1).

При моделировании процесса генерации примеси в маслосистему за временной интервал принимался отрезок времени в 50 ч, что соответствует интервалу отбора пробы масла на анализ. Критерием технического состояния двигателя принималась величина массовой доли C_{Fe} . За отправную точку

моделирования принималось исправное состояние двигателя со значением $C_{Fe}=0,1$ г/т, за конечную точку моделирования исправного состояния двигателя принималось $C_{Fe} < \bar{x} + 2\sigma$.

Таблица 2.3 – Результаты моделирования фильтрации металлической примеси в маслосистеме через 75 мкм фильтр с постоянным источником генерации частиц в течение 50 ч (3000 мин)

№	Параметры распредел.	Наработка, ч	C_{Fe} $\bar{x} + 2\sigma$, г/т	Сгенерированная C_{Fe} $< \bar{x} + 2\sigma$, г/т	Фильтр 75 мкм ($D_\mu^\phi=75$, $D_\sigma^\phi=1,5$)			
					$M_{\text{масло примеси}}$, мкг	$M_{\text{фильтр примеси}}$, мкг	$\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$, мкг/мин	$\tau_{\text{масло примеси}}$, мкг/мин
1	$D_\mu=3,2$; $D_\sigma=1,7$; $N_{\text{gist}}=25$; $D_{\text{max}}=50$	1-500	6,13	6,12	214200	0	70,23	70,23
		500-1Т	1,55	1,54	53900	0	16,80	16,80
		1Т-2Т	1,01	1	35000	0	10,50	10,50
		2Т-3Т	1,15	1,14	39900	0	12,13	12,13
		3Т-10Т	1,37	1,36	47600	0	14,70	14,70
2	$D_\mu=24,26$; $D_\sigma=2,66$; $N_{\text{gist}}=50$; $D_{\text{max}}=100$	1-500	6,13	6,1103	213861	215309	140,82	71,287
		500-1Т	1,55	1,5411	53937	55077	34,42	17,979
		1Т-2Т	1,01	0,9968	34886	34828	21,24	11,628
		2Т-3Т	1,15	1,1447	40063	40424	24,81	13,354
		3Т-10Т	1,37	1,3694	47950	47954	30,07	15,983
3	$D_\mu=34,33$; $D_\sigma=2,2$; $N_{\text{gist}}=145$; $D_{\text{max}}=290$	1-500	6,13	6,1257	214398	1557380	577,04	71,466
		500-1Т	1,55	1,5416	54306	388284	134,56	18,102
		1Т-2Т	1,01	1,0009	34999	257179	84,28	11,666
		2Т-3Т	1,15	1,1421	39498	282698	93,58	13,166
		3Т-10Т	1,37	1,3566	47479	341111	115,81	15,826
4	$D_\mu=33,46$; $D_\sigma=1,93$; $N_{\text{gist}}=100$; $D_{\text{max}}=200$	1-500	6,13	6,1264	215147	576863	258,16	71,715
		500-1Т	1,55	1,5365	53777	144398	61,14	17,925
		1Т-2Т	1,01	1,0061	35211	94994	38,53	11,737
		2Т-3Т	1,15	1,1451	40076	106611	44,18	13,358
		3Т-10Т	1,37	1,3651	47777	125636	53,29	15,925

где $M_{\text{масло примеси}}$ – масса примеси в масле, мкг; $M_{\text{фильтр примеси}}$ – масса примеси, осажженная на фильтре, мкг; $\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$ – скорость генерации примеси в маслосистему, мкг/мин; $\tau_{\text{масло примеси}}$ – скорость генерации примеси в масло, мкг; причем $\tau_{\text{масло примеси}} = \tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}} - \tau_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}}$.

В таблице 2.3 показаны результаты численного эксперимента, в процессе которого имитировалось многократное прохождение через 75 мкм фильтр МФС-30 наборов частиц, сгенерированных в соответствии с заданными параметрами

распределений (таблица 2.1), за период времени $t_{\text{прокачки}}=3000$ мин равный интервалу отбора пробы масла на спектральный анализ (50 ч).

Скорость генерации частиц в маслосистему $\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$ подбиралась таким образом, чтобы величина C_{Fe} за период прокачки не достигла границы $\bar{x} + 2\sigma$, но приблизилась в ней вплотную ($C_{Fe} < \bar{x} + 2\sigma$).

При этом, за исходную точку принималась совокупная масса частиц примеси $M_{\text{примеси}} \sim 3500$ мкг, что в объеме масла $V_{\text{масла}}=40$ л составляло массовую долю $C_{Fe}=0,1$ г/т. Скорость прокачки составила 40 л/мин, т.е. весь объем масла в маслосистеме проходит через фильтр за одну минуту.

Как видно из таблицы 2.3, скорость генерации примеси изменяется при разных параметрах распределений. Более того, распределение примеси по массе между фильтром ($M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}}$) и маслом ($M_{\text{примеси}}^{\text{масло}}$) различается и различается их соотношение в зависимости от параметров исходного распределения и параметров маслофильтра.

Например, при фильтрации частиц распределения двигателя №1 100% примеси генерируется в масло. Это связано с тем, что средний размер частиц и их максимальный размер намного меньше ячеек фильтра и вероятность осаждения таких частиц на фильтр даже при многократной прокачке стремится к нулю. Исправный двигатель с таким распределением частиц по размерам и фильтром 75 мкм отличается самой низкой скоростью генерации примеси для достижения границы $\bar{x} + 2\sigma$.

Средний размер частиц распределения №2 больше, чем у №1, а доля примеси, оставшейся в масле $M_{\text{примеси}}^{\text{масло}}$ составляет $\sim 50\%$.

В случае с распределением №4 для достижения границы $\bar{x} + 2\sigma$ потребуется большая скорость генерации примеси, чем при распределении №2, при прочих равных. Это связано с тем, что у распределения №4 средний размер частиц и максимальный размер частиц больше, чем у распределения №2, а следовательно, передаточная функция фильтра более эффективно исключает частицы из масла. В

этом случае доля $M_{\text{примеси}}^{\text{масло}}$ составляет $\sim 40\%$ от общего объема генерируемой примеси.

При схожем среднем размере частиц распределений №3 и №4 доля $M_{\text{примеси}}^{\text{масло}}$ у распределения №3 составляет $\sim 14\%$. Фильтр 75 мкм задерживает частицы распределения №3 эффективнее, чем частицы распределения №4. Это вызвано тем, что максимальный размер частиц D_{max} и D_{σ} распределения №3 выше, чем у распределения №4 (рисунок 2.3, в) и г)).

Рассмотрим моделирование процесса фильтрации металлической примеси на примере 40 мкм фильтра МФС-94. Результаты представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты моделирования фильтрации металлической примеси в маслосистеме через 40 мкм фильтр с постоянным источником генерации частиц в течение 50 ч (3000 мин)

№	Параметры распред.	Нара- ботка, ч	C_{Fe} $\bar{x} + 2\sigma$, г/т	Сгенери- рованная C_{Fe} $< \bar{x} + 2\sigma$, г/т	Фильтр 40 мкм ($D_{\mu}^{\phi}=40$ мкм, $D_{\sigma}^{\phi}=1,5$ мкм)			
					$M_{\text{примеси}}^{\text{масло}}$, мкг	$M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}}$, мкг	$\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$, мкг/мин	$\tau_{\text{примеси}}^{\text{масло}}$, мкг/мин
1	$D_{\mu}=3,2$; $D_{\sigma}=1,7$; $N_{\text{gist}}=25$; $D_{\text{max}}=50$	1-500	6,13	6,12	214200	0	71,40	71,40
		500-1т	1,55	1,54	53900	0	17,97	17,97
		1т-2т	1,01	1	35000	0	11,67	11,67
		2т-3т	1,15	1,14	39900	0	13,30	13,30
		3т-10т	1,37	1,36	47600	0	15,87	15,87
2	$D_{\mu}=24,26$; $D_{\sigma}=2,66$; $N_{\text{gist}}=50$; $D_{\text{max}}=100$	1-500	6,13	6,123	214904	2191642	798,08	71,63
		500-1т	1,55	1,535	53725	564519	198,13	17,91
		1т-2т	1,01	1,0047	35165	357994	129,21	11,72
		2т-3т	1,15	1,148	40250	406917	147,27	13,42
		3т-10т	1,37	1,3613	47645	483452	175,26	15,88
3	$D_{\mu}=34,33$; $D_{\sigma}=2,2$; $N_{\text{gist}}=145$; $D_{\text{max}}=290$	1-500	6,13	6,121	214255	11512780	3917,68	71,42
		500-1т	1,55	1,543	53989	2860899	970,51	18,00
		1т-2т	1,01	1,0015	35053	1878189	625,21	11,68
		2т-3т	1,15	1,1417	39960	2125780	710,35	13,32
		3т-10т	1,37	1,3624	47684	2540480	849,41	15,89
4	$D_{\mu}=33,46$; $D_{\sigma}=1,93$; $N_{\text{gist}}=100$; $D_{\text{max}}=200$	1-500	6,13	6,1218	214262	4586227	1598,75	71,42
		500-1т	1,55	1,5429	54001	1157847	399,51	18,00
		1т-2т	1,01	1,001	35036	750434	257,48	11,68
		2т-3т	1,15	1,1402	39906	853166	293,51	13,30
		3т-10т	1,37	1,3611	47639	1023139	352,54	15,88

Для распределения №1 ситуация не изменилась. Средний размер частиц распределения все еще существенно меньше ячеек фильтра, а из-за небольшой дисперсии частицы в правой части распределения настолько редки, что при

многократном повторении эксперимента максимальная масса примеси на фильтре составила 18 мкг. Данной массой примеси на фильтре можно пренебречь, поскольку ее доля составляет менее 0,01% от общей массы примеси в маслосистеме.

Для распределений №2-4 скорость генерации примеси $\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$ для достижения границы $\bar{x} + 2\sigma$ существенно выросла. Это связано с тем, что фильтрующая способность фильтра МФС-94 выше, чем у МФС-30.

Так, при фильтрации распределения №2 скорость генерации примеси выросла более чем в 5 раз. Например, для наработки 0-500 ч $\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$ увеличилась со 140 мкг/мин до 798 мкг/мин. При этом доля генерируемой примеси, способной пройти через фильтр, составила лишь 10%.

Для распределения №4 скорость генерации выросла более чем в 6,2 раза, а доля генерируемой примеси, способной пройти через фильтр, составила лишь 5%.

В случае с распределением №3 $M_{\text{примеси}}^{\text{масло}}$ составляет ~2% от общего объема генерируемой примеси. Чтобы превысить границу $\bar{x} + 2\sigma$ при таких параметрах распределения и фильтра, в маслосистему ГТД должно генерироваться 3917,68 мкг/мин и за 50 ч наработки на фильтре накопится 11,5 г металлической примеси.

При такой величине накопленной массы на маслофильтре и величине массовой доли, не превысившей граничные значения, диагностическая ценность параметра «массовая доля» ничтожно мала. Опыт диагностирования показал, что такая масса примеси характерна для двигателей с повреждением.

Таким образом, в результате проведенного моделирования определены численные значения скорости поступления металлической примеси (скорость поступления частиц из наборов, сгенерированных в соответствии с параметрами распределений частиц по размерам, измеренным в пробах смывов с маслофильтров реальных двигателей), для исправного состояния двигателя и двигателя с повреждением на протяжении всего жизненного цикла.

Показано, что чем выше средний размер частиц D_μ , максимальный размер частиц D_{max} и D_σ в исходном распределении, тем эффективнее частицы осаждаются на фильтре. При этих условиях для достижения граничного значения $C_{Fe} = \bar{x} + 2\sigma$ потребуется большая скорость генерации примеси. Данное утверждение справедливо для любого другого элемента примеси.

Моделирование показало, что передаточная функция 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 примесей $t_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$), чтобы величина массовой доли в пробе масла превысила граничное значение $C = \bar{x} + 2\sigma$ и в двигателе был обнаружен повышенный износ.

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_μ , D_σ , 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.

2.3. Моделирование процесса фильтрации при наличии источника частиц, переменного во времени (импульсное поступление частиц)

Одним из наиболее частых и опасных типов изнашивания при эксплуатации газотурбинных двигателей является выкрашивание поверхностей трения подшипников качения и зубчатых колес. Процесс усталостного выкрашивания достаточно сложный, делится на несколько этапов, при которых образуются частицы различного вида (сферические, пластинчатые, частицы в виде хлопьев) в диапазоне размеров от единиц микрометров до 250 мкм [19, 57].

Моделирование процесса выкрашивания на редукторной установке с 45 мкм фильтром при отборе пробы на анализ в интервале времени 30 сек. – 30 минут показало, что общая масса частиц *в пробе масла* недостаточна для заметного повышения общего содержания частиц изнашивания [57].

Ограничением результатов, в поставленном эксперименте [57] является отсутствие данных по влиянию тонкости фильтрации маслофильтра и массы импульсно поступивших в маслосистему частиц в разные промежутки времени за период 50 часов на распределение частиц, накопленных на маслоfiltре и величину массовой доли в маслосистеме двигателя.

Поэтому решалась задача по моделированию влияния передаточной функции маслофильтра, вида распределения импульсно поступающих (вбрасываемых) в маслосистему двигателя частиц, массы вбрасываемых частиц и периодичности отбора пробы на анализ на вид распределения частиц на маслоfiltре двигателя и соотношения накопленной массы примеси на маслоfiltре и в маслосистеме.

При моделировании процесса выкрашивания задавался импульсный источник генерации частиц, появляющийся в произвольный момент времени и с параметрами функции распределения отличными от параметров исходного распределения частиц. Сгенерированный набор частиц выкрашивания попадал в

маслосистему и наравне с частицами исходного распределения, взаимодействовал с передаточной функцией фильтра.

За исходное распределение частиц в маслосистеме принято распределение исправного двигателя №2 (таблица 2.1). К этому распределению на определенном цикле фильтрации вбрасывался набор частиц с параметрами распределения, отличающимися от параметров исходного распределения и от параметров примеси, осаждаемой на фильтре.

Масса примеси, поступающей импульсно (вбрасываемой), рассчитана таким образом, чтобы в заданном цикле прокачки (фильтрации) обеспечить превышение в пробе масла параметра C по элементу Fe на уровне $\bar{x} + 3\sigma$, характерном при заданном уровне наработки согласно статистической модели исправного двигателя (СМИД).

Расчет массы импульсно поступающей (вбрасываемой) примеси приведен в таблице 2.5 в соответствии с величинами параметра C_{Fe} СМИД (таблица 2.2) для маслосистемы объемом 40 л.

Таблица 2.5 – Расчет массы примеси, характерный для граничных значений C_{Fe} на уровне $\bar{x} + 2\sigma$ и $\bar{x} + 3\sigma$ для маслосистемы объемом $V_{\text{масла}} = 40$ л при различных периодах наработки

Наработка, ч	М _{примеси} , эквивалентная C_{Fe} в объеме масла $V_{\text{масла}} = 40$ л, мкг		
	Х среднее	$\bar{x} + 2\sigma$	$\bar{x} + 3\sigma$
1-500	30100	214550	787850
500-1000	8750	54250	182000
1000-2000	7700	35350	108850
2000-3000	7350	40250	124950
3000-10000	7350	47950	161700

В правом столбце таблицы 2.5 выделены массы примеси, которые использовались при дальнейшем моделировании.

Величина $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}}$ выбрана таким образом, чтобы порция частиц выкрашивания была достаточной для определения степени ее влияния при вбросе в маслосистему, при этом была привязана как в граничным значениям СМИД, так

и к процессу определения технического состояния двигателя согласно нормативной документации.

При моделировании постепенного развития процесса изнашивания (таблица 2.3, 2.4) параметры скорости генерации примеси $\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$ уже определены.

Для оценки влияния импульсного поступления частиц на величину массовой доли примеси в масле проведен численный эксперимент, в котором к процессу генерации примеси в маслосистему, описанному п.2.2. настоящей работы, на первом, предпоследнем и каждом десятом часу вбрасывались наборы частиц с массой, обеспечивающей превышение $C_{Fe} = \bar{x} + 2\sigma$ в объеме маслосистемы в данном цикле прокачки. Результаты моделирования приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Моделирование выброса (импульсного поступления частиц) при различной наработке. Фильтр с ячейкой $D_{\mu}^{\text{фильтр}} = 75$ мкм; исходное распределение №2; вброс частиц с параметрами $D_{\mu}^{\text{выброс}} = 100$ мкм, $D_{\sigma}^{\text{выброс}} = 2$ мкм; $t_{\text{прокачки}} = 3000$ мин (50 ч)

Наработка, ч	$M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}}$, МКГ	Цикл выброса	C_{Fe} , Г/Т	$M_{\text{примеси}}^{\text{масло}}$, МКГ	$M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}}$, МКГ	$\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$, МКГ/М
1-500	787850	без выброса	6,1103	213861	215309	140,82
		60	12,5500	439471	776918	
		600	12,5427	438993	777393	
		1200	12,5671	439847	776425	
		1800	12,5701	439954	776354	
		2400	12,6380	442330	774040	
		2940	13,1637	460729	755573	
500-1000	182000	без выброса	1,5411	53937	55077	34,42
		60	3,0364	106272	184990	
		600	3,0542	106896	184413	
		1200	3,0484	106695	184688	
		1800	3,0487	106704	184680	
		2400	3,0660	107309	184022	
		2940	3,1897	110690	179710	
1000-2000	108850	без выброса	0,9968	34886	34828	21,24
		60	1,8854	65990	112627	
		600	1,8921	66223	112459	
		1200	1,8920	66218	112322	
		1800	1,8985	66447	112197	
		2400	1,8981	66431	112220	
		2940	1,9685	68896	109702	

Продолжение таблицы 2.6

2000-3000	124950	без выброса	1,1447	40063	40424	24,81
		60	2,1740	76089	129398	
		600	2,1758	76154	129341	
		1200	2,1742	76098	129313	
		1800	2,1644	75755	129699	
		2400	2,1831	76408	129145	
		2940	2,2568	78989	126492	
3000-10000	161700	без выброса	1,3694	47950	47954	30,07
		60	2,7155	95042	162936	
		600	2,7097	94839	163142	
		1200	2,7057	94698	163177	
		1800	2,7133	94964	162952	
		2400	2,7306	95570	162392	
		2940	2,8346	99212	158749	

Как видно из таблицы 2.6, при генерации частиц согласно исходному распределению без выброса частиц, маслофильтр с ячейкой $D_{\mu}^{\text{фильтр}} = 75$ мкм выделяет $M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}} \sim 50\%$ из общей массы примеси при разной скорости генерации примеси в маслосистему.

При импульсном поступлении частиц с параметрами $D_{\mu}^{\text{выброс}} = 100$ мкм, $D_{\sigma}^{\text{выброс}} = 2$ мкм происходит резкое увеличение суммарной массы примеси в маслосистеме таким образом, что

$$M_{\text{примеси}} = M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}} + M_{\text{примеси}}^{\text{масло}} + M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}} \quad (3)$$

При этом доля примеси, осажденной на фильтр, по окончании фильтрования возрастает до $M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}} \sim 63\%$.

При данных параметрах моделирования и вида распределения примеси между маслом и фильтром величина C_{Fe} возрастает в 1,89-2,05 раза сразу после поступления частиц, если выброс происходит на 1-40 ч фильтрации.

Если же частицы выкрашивания поступают на 49 часе фильтрации, то массовая доля возрастает в 1,97-2,15 раз. Дополнительное увеличение параметра C_{Fe} на 49 часу в данном случае объясняется тем, что некоторое количество импульсно поступивших частиц за 1 оставшийся час фильтрации не успевает накопить вероятность для осаждения на фильтре (в соответствии с его

передаточной функцией) и остается в масле, вызывая дополнительное увеличение параметра C_{Fe} и «недобор» $M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}}$.

В абсолютных величинах разница C_{Fe} между выбросом на 40-м и 49-м часу составляет 0,07-0,52 г/т, в зависимости от наработки.

Таким образом, импульсное поступление частиц с параметрами $D_{\mu}^{\text{выброс}}=100$ мкм, $D_{\sigma}^{\text{выброс}}=2$ мкм и массой $M_{\text{примеси}}$, эквивалентной $C_{Fe} = \bar{x} + 2\sigma$ в объеме масла $V_{\text{масла}} = 40$ л приводит к тому, что C_{Fe} в пробе масла заметно возрастает, однако ни в одном из рассмотренных случаев не превышает границу $\bar{x} + 3\sigma$ по окончании времени прокачки и фильтрации масла (величины $C_{Fe} = \bar{x} + 3\sigma$ для всех периодов наработки приведены в таблице 2.2).

При моделировании выброса при различной наработке для фильтра с ячейкой $D_{\mu}^{\text{фильтр}} = 40$ мкм влияние импульсного поступления частиц заметно снижено. Результаты моделирования выброса частиц с параметрами $D_{\mu}^{\text{выброс}}=100$ мкм, $D_{\sigma}^{\text{выброс}}=2$ мкм для фильтра 40 мкм приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Моделирование выброса (импульсного поступления частиц) при различной наработке. Фильтр с ячейкой $D_{\mu}^{\text{фильтр}} = 40$ мкм; исходное распределение №2; вброс частиц с параметрами $D_{\mu}^{\text{выброс}}=100$ мкм, $D_{\sigma}^{\text{выброс}}=2$ мкм; $t_{\text{прокачки}}=3000$ мин (50 ч)

Наработка, ч	$M_{\text{выброс примеси}}, \text{мкг}$	Цикл выброса	$C_{Fe}, \text{г/т}$	$M_{\text{масло примеси}}, \text{мкг}$	$M_{\text{фильтр примеси}}, \text{мкг}$	$\tau_{\text{общ примеси}}, \text{мкг/м}$
1-500	787850	без выброса	6,1282	214904	2191642	798,08
		60	6,3733	223063	2965405	
		600	6,3802	223306	2965214	
		1200	6,3948	223817	2964633	
		1800	6,3955	223842	2964671	
		2400	6,4124	224636	2963803	
		2940	6,4612	226112	2962176	
500-1000	182000	без выброса	1,5351	53725	564519	198,13
		60	1,5953	55836	726777	
		600	1,5938	55783	726783	
		1200	1,6032	56112	726412	
		1800	1,6041	56143	726449	
		2400	1,6049	56172	726391	
		2940	1,6114	56398	726167	

Продолжение таблицы 2.7.

1000-2000	108850	без выброса	1,0047	35165	357994	129,21
		60	1,0433	36513	466089	
		600	1,0460	36610	466005	
		1200	1,0471	36648	466013	
		1800	1,0440	36539	466117	
		2400	1,0469	36641	465928	
		2940	1,0480	36679	465945	
2000-3000	124950	без выброса	1,1480	40250	406917	147,27
		60	1,1853	41486	531454	
		600	1,1877	41568	531388	
		1200	1,1945	41805	531145	
		1800	1,1933	41766	531106	
		2400	1,1990	41966	530900	
		2940	1,2045	42155	530665	
3000-10000	161700	без выброса	1,3613	47645	483452	175,26
		60	1,4124	49432	644162	
		600	1,4148	49517	644163	
		1200	1,4140	49489	644047	
		1800	1,4133	49465	644159	
		2400	1,4231	49809	643828	
		2940	1,4294	50029	643592	

В таблице 2.7 показано, что при генерации частиц согласно исходному распределению **без выброса**, маслофильтр с ячейкой $D_{\mu}^{\text{фильтр}} = 40$ мкм выделяет $M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}} \sim 90\%$ из общей массы примеси при разной скорости генерации примеси в маслосистему. При возникновении **импульсного поступления** эта цифра возрастает до $M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}} \sim 92,5\%$.

При данных параметрах моделирования и параметрах импульсно поступающей примеси величина C_{Fe} возрастает в $\sim 1,05$ раза после поступления частиц, т.е. на $\sim 5\%$ (против 90-115% при 75 мкм фильтре). Такое возрастание величины C_{Fe} сохраняется вне зависимости от того, в какой момент произошел выброс частиц в маслосистему. Разница между выбросом на 40 и 49 часах фильтрации составляет не более $0,8\%$ ($< 0,05$ г/т), что не превышает погрешности измерения массовой доли большинством спектральных методов.

Таким образом, на примере 40 мкм фильтра видно, что при импульсном поступлении частиц увеличение массовой доли C_{Fe} существенно ниже, чем при таком же процессе, но с 75 мкм фильтром (таблица 2.6).

Из результатов, представленных в таблице 2.7 также видно, что 40 мкм фильтр гораздо эффективнее «исключает» металлическую примесь, чем 75 мкм фильтр. Это означает, что при применении 40 мкм фильтра обнаружить следы износного процесса, приведшего к импульсному поступлению частиц с $D_{\mu}^{\text{выброс}}=100$ мкм, маловероятно.

Однако, в таблицах 2.6 и 2.7 рассмотрено импульсное поступление частиц только со средним размером $D_{\mu}^{\text{выброс}}=100$ мкм. В обоих случаях средний размер частиц превышает размер ячеек фильтра. Для более широкой оценки влияния массы импульсно поступающих частиц $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}}$ на величину массовой доли C_{Fe} рассмотрим моделирование процесса выкрашивания с фильтрами 75 мкм и 40 мкм при наработке 0-500 часов с частицами в диапазоне размеров $D_{\mu}^{\text{выброс}}$ от 10 мкм до 300 мкм (таблицы 2.8 и 2.9).

Таблица 2.8 – Моделирование выброса (импульсного поступления частиц) при различном среднем размере частиц выкрашивания $D_{\mu}^{\text{выброс}}$. Фильтр с ячейкой $D_{\mu}^{\text{фильтр}} = 75$ мкм; исходное распределение №2; наработка 1-500 ч; $t_{\text{прокачки}}=3000$ мин (50 ч); $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}}=787850$ мкг

$D_{\mu}^{\text{выброс}}$, мкм	Цикл выброса	C_{Fe} , Г/Т	$M_{\text{масло}}^{\text{примеси}}$, мкг	$M_{\text{фильтр}}^{\text{примеси}}$, мкг	$\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$, мкг/м
10	без выброса	6,1103	213861	215309	140,82
	60	26,1791	916268	301515	
	600	26,1880	916579	301176	
	1200	26,1919	916719	300999	
	1800	26,2049	917172	300554	
	2400	26,2398	918391	299385	
	2940	26,3793	923274	294486	

Продолжение таблицы 2.8

25	без выброса	6,1103	213861	215309	140,82
	60	19,9441	698043	518698	
	600	19,9258	697401	519289	
	1200	19,9189	697160	519564	
	1800	19,9632	698713	518006	
	2400	19,9943	699799	516922	
	2940	20,4601	716104	500652	
50	без выброса	6,1103	213861	215309	140,82
	60	15,7141	549994	666476	
	600	15,6859	549006	667466	
	1200	15,7074	549759	666716	
	1800	15,7161	550062	666384	
	2400	15,7850	552474	663900	
	2940	16,3005	570518	645937	
100	без выброса	6,1103	213861	215309	140,82
	60	12,5639	439736	776636	
	600	12,5849	440472	775960	
	1200	12,5612	439640	776643	
	1800	12,5717	440008	776321	
	2400	12,6396	442385	773898	
	2940	13,1650	460775	755690	
200	без выброса	6,1103	213861	215309	140,82
	60	10,2361	358261	857895	
	600	10,2541	358892	857380	
	1200	10,2262	357916	858365	
	1800	10,2596	359086	857224	
	2400	10,3158	361052	855136	
	2940	10,7716	377007	839239	
300	без выброса	6,1103	213861	215309	140,82
	60	9,1954	321840	894345	
	600	9,1837	321428	894681	
	1200	9,1849	321471	894679	
	1800	9,2006	322019	894282	
	2400	9,2424	323483	892674	
	2940	9,6577	338018	878181	

В таблице 2.8 отправная точка моделирования прежняя, при генерации частиц согласно исходному распределению без поступления частиц выкрашивания, маслофильтр с ячейкой $D_{\mu}^{\text{фильтр}} = 75 \text{ мкм}$ выделяет $M_{\text{примеси}}^{\text{фильтр}} \sim 50\%$. Разница лишь в том, что скорость генерации примеси $\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$ не изменяется, поскольку не изменяется период наработки двигателя, и, соответственно, не изменяются граничные значения по СМВД.

При возникновении импульсного поступления частиц, также, как и в таблице 2.6 происходит резкое увеличение суммарной массы примеси $M_{\text{примеси}}$ на величину $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}}$ в маслосистеме. Возникновение $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}}$, в свою очередь, изменяет распределение металлической примеси между фильтром и маслом, что отражается на величине C_{Fe} в масле. Однако, в данном случае величина полученной массовой примеси C_{Fe} в масле зависит не только от времени вброса частиц выкрашивания, но и от их размера $D_{\mu}^{\text{выброс}}$.

Из таблицы 2.8 видно, как с увеличением размера импульсно поступающих частиц их влияние на величину массовой доли прямо пропорционально отношению $M_{\text{масло}}^{\text{примеси}}/M_{\text{фильтр}}^{\text{примеси}}$.

Так, при выбросе относительно мелких частиц $D_{\mu}^{\text{выброс}} = 10$ мкм массовая доля возрастает в 4,32 раза (с 6,11 г/т до 26,38 г/т), а $M_{\text{масло}}^{\text{примеси}}/M_{\text{фильтр}}^{\text{примеси}} = 3,13$.

Как видно, при $D_{\mu}^{\text{выброс}} = 10$ мкм соотношение $M_{\text{масло}}^{\text{примеси}}/M_{\text{фильтр}}^{\text{примеси}} > 1$. Это означает, что большая часть импульсно поступившей примеси осталась в масле и не была уловлена маслофильтром, при этом величина $C_{Fe} = 26,38$ г/т превысила границу $\bar{x} + 3\sigma$ (22,51 г/т). Превышение границы $\bar{x} + 3\sigma$ при выбросе частиц выкрашивания в маслосистему сохраняется при увеличении среднего размера его частиц вплоть до $D_{\mu}^{\text{выброс}} = 18$ мкм.

Дальнейшее увеличение среднего размера частиц выкрашивания приводит к тому, что при $D_{\mu}^{\text{выброс}} = 36$ мкм соотношение $M_{\text{масло}}^{\text{примеси}}/M_{\text{фильтр}}^{\text{примеси}} \sim 1$, а массовая доля при этом возрастает уже в 2,85 раза (с 6,11 г/т до 17,42 г/т).

Приведенные цифры означают, что при использовании 75 мкм фильтра возможна ситуация, когда большая часть импульсно поступающих частиц останется в масле, что является необходимым условием увеличения параметра C_{Fe} . Согласно условиям проведенного моделирования, это возможно при среднем размере частиц до 36 мкм, при этом превышение границы $C_{Fe} = \bar{x} + 3\sigma$ возможно в диапазоне размеров до 18 мкм.

Далее, при увеличении размеров частиц влияние массы примеси на величину массовой доли в масле снижается настолько, что превышение границы $C_{Fe} = \bar{x} + 3\sigma$ при данных условиях моделирования уже невозможно. Очевидно, это вызвано тем, что передаточная функция фильтра, с увеличением среднего размера частиц, поступающих импульсно, все лучше исключает эти частицы из масла, при этом время импульсного поступления примеси не играет решающего значения, поскольку относительное изменение C_{Fe} при различном времени выброса составляет $\leq 3\%$.

В таблице 2.9 приведены результаты моделирование процесса импульсного поступления частиц на примере 40 мкм фильтра.

Таблица 2.9 – Моделирование выброса (импульсного поступления частиц) при различном среднем размере частиц выкрашивания $D_{\mu}^{\text{выброс}}$. Фильтр с ячейкой $D_{\mu}^{\text{фильтр}} = 40$ мкм; исходное распределение №2; наработка 1-500 ч; $t_{\text{прокачки}} = 3000$ мин (50 ч); $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}} = 787850$ мкг

$D_{\mu}^{\text{выброс}}$, мкм	Цикл вброса	C_{Fe} , г/т	$M_{\text{масло примеси}}$, мкг	$M_{\text{фильтр примеси}}$, мкг	$\tau_{\text{примеси}}^{\text{общ}}$, мкг/м
10	без выброса	6,1282	214904	2191642	798,08
	60	17,0125	595556	2594442	
	600	17,0642	597247	2592692	
	1200	17,1487	600204	2589599	
	1800	17,2600	604335	2585661	
	2400	17,4037	609131	2580756	
	2940	17,7660	621811	2568094	
25	без выброса	6,1282	214904	2191642	798,08
	60	9,0832	317911	2870823	
	600	9,1121	318922	2869966	
	1200	9,1667	320835	2867947	
	1800	9,2250	322873	2865812	
	2400	9,3153	326035	2862770	
	2940	9,5369	333789	2854961	
50	без выброса	6,1282	214904	2191642	798,08
	60	7,0464	246623	2942013	
	600	7,0534	246868	2941735	
	1200	7,0773	247706	2940920	
	1800	7,1089	248813	2939831	
	2400	7,1404	249914	2938776	
	2940	7,2345	253208	2935349	

Продолжение таблицы 2.9

100	без выброса	6,1282	214904	2191642	798,08
	60	6,3733	223063	2965405	
	600	6,3802	223306	2965214	
	1200	6,3948	223817	2964633	
	1800	6,3955	223842	2964671	
	2400	6,4124	224636	2963803	
	2940	6,4612	226112	2962176	
200	без выброса	6,1282	214904	2191642	798,08
	60	6,1836	216424	2971965	
	600	6,1873	216556	2971855	
	1200	6,1882	216587	2971624	
	1800	6,2028	217098	2971146	
	2400	6,1977	216920	2971359	
	2940	6,2151	217528	2970765	
300	без выброса	6,1282	214904	2191642	798,08
	60	6,1467	215135	2973009	
	600	6,1437	215028	2973282	
	1200	6,1434	215018	2973176	
	1800	6,1467	215134	2972973	
	2400	6,1521	215322	2972874	
	2940	6,1546	215410	2972737	

В таблице 2.9 показано, что при импульсном поступлении в маслосистему массы частиц с $D_{\mu}^{\text{выброс}}$ в диапазоне 10-300 мкм в присутствии 40 мкм фильтра не привело к превышению параметра C_{Fe} границы $\bar{x} + 3\sigma$. При выбросе частиц $D_{\mu}^{\text{выброс}}=10$ мкм массовая доля увеличилась в 2,89 раза, а при выбросе $D_{\mu}^{\text{выброс}}=300$ мкм – в 1,004 раза (т.е. на 0,4%). Во всех случаях соотношение $M_{\text{масло примеси}}/M_{\text{фильтр примеси}}$ составило $<0,1$ (т.е. $M_{\text{масло примеси}}$ составила менее 10% от общего количества примеси). Другими словами, подавляющая доля примеси была удержана маслофильтром и не участвовала в накоплении массы примеси в масле. При таких параметрах фильтра время импульсного поступления примеси также не играет большой роли, поскольку при выбросе на различных циклах фильтрации величина C_{Fe} колеблется в пределах 2%,

Отдельно проведенная серия измерений показала, что при наличии 40 мкм фильтра возможно превышение границы $\bar{x} + 3\sigma$ при импульсном поступлении в масло примеси с параметрами $D_{\mu}^{\text{выброс}} = 5$ мкм и $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}}=787850$ мкг. Однако,

учитывая характер протекания такого износного процесса, как выкрашивание, на практике выброс частиц с такими параметрами распределения маловероятен.

Таким образом, проведено моделирование, при котором 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 параметру «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 ($D_{\mu}^{\text{выброс}} = 5 \text{ мкм}$, $M_{\text{примеси}}^{\text{выброс}} = 787850 \text{ мкг}$) маловероятен.

Выводы по главе 2

1. Разработана программа для математического моделирования износных процессов, протекающих в маслосистеме авиационного ГТД в условиях, приближенных к реальным. Программа позволяет гибко изменять параметры маслосистемы и исходные параметры металлической примеси, передаточную функцию фильтра и исследовать износные процессы для определения возможности выявления повреждений узлов двигателя на различных этапах его жизненного цикла.

2. Показано, что при постоянном источнике генерирования частиц передаточная функция фильтра влияет на распределение массы примеси $M_{\text{примеси}}$, накопленной на фильтре и циркулирующей в маслосистеме. Чем меньше 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 и в двигателе был обнаружен износный процесс.

3. Показано, что обнаружение выкрашивания по результатам анализа пробы масла возможно при соблюдении некоторых условий. Так, в соответствии с условиями моделирования, 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.

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. Учитывая тот факт, что параметры процесса изнашивания (параметры распределения частиц по размерам, скорость генерации примеси, наличие импульсного поступления частиц, параметры распределения импульсно поступающих частиц по размерам) заранее неизвестны, обнаружение процессов изнашивания в маслосистеме и определение типа изнашивания по величине массовой доли сильно зависит от размеров частиц, генерируемых в процессе изнашивания. Поэтому при оценке состояния двигателя необходимо одновременно учитывать параметры 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.

Частицы, осажденные на фильтре, являются не менее ценным источником информации о техническом состоянии двигателя и его узлов, наряду с частицами, находящимися в пробе масла. Поскольку маслофильтр может задерживать на себе существенную долю металлической примеси (до 92,5%), то анализ проб смыва с маслофильтра может существенно дополнить результаты диагностирования по пробе масла.

При анализе пробы смыва возникает проблема выбора диагностических параметров. Учитывая количество примеси, осаждаемой на маслофильтре, целесообразно провести оценку применения других диагностических параметров, связанных с элементным составом частиц и их количеством.

Глава 3. Обоснование и совершенствование способов измерения параметров частиц изнашивания СВЧ плазменным методом для оценки технического состояния узлов маслосистемы ГТД

Для разработки эффективных технологий диагностирования и получения достоверных результатов оценки технического состояния двигателя необходимы полные сведения об объекте исследования – металлических частицах изнашивания. В частности, необходимы следующие сведения:

- сведения о морфологии частиц изнашивания;
- сведения по диапазону размеров частиц в исправном двигателе и при возникновении повреждения в зависимости от его типа;
- сведения по изменению элементного состава частиц изнашивания в исправном двигателе и в двигателе с повреждением.

По первому вопросу в периодических публикациях имеется возможность найти наиболее полные сведения [7, 32, 42]. По второму вопросу имеется только отдельная, фрагментарная информация [6, 9, 39, 52, 80]. По третьему вопросу можно найти информацию для частиц размером более 500 мкм [81]. Для частиц в диапазоне размеров от единиц до 200 мкм информация практически отсутствует [62].

В этой связи цель главы заключалась в получении и систематизации сведений о влиянии разных типов изнашивания на вид распределений частиц по размерам и их элементный состав для исправных двигателей и двигателей с повреждениями, при измерениях параметров частиц изнашивания СВЧ плазменным методом. Корректность результатов, полученных СВЧ плазменным методом оценивалась с помощью независимого микрорентгеноспектрального метода.

Использование микрорентгеноспектрального метода обусловлено получением объективной информации о распределении частиц изнашивания по размерам и их элементном составе. Данный метод обладает наибольшими

информационными и точностными возможностями при измерении параметров частиц изнашивания в диапазоне размеров от единиц до нескольких сотен мкм.

3.1. Краткая характеристика и возможности СВЧ плазменного метода

Одним из наиболее высокодостоверных и перспективных методов контроля состояния смазываемых узлов трения авиационных ГТД является СВЧ плазменный метод [17, 20]. Принцип действия метода и получение диагностической информации в данном разделе не рассматривается, поскольку ранее он достаточно подробно описан в работах [19, 33, 82]. Однако имеет смысл напомнить об основных узлах анализатора, определяющих его аналитические и диагностические возможности.

В качестве источника возбуждения спектров в методе применяется оригинальная конструкция СВЧ плазмотрона циклонного типа, работающего на воздухе при атмосферном давлении, подаваемым от компрессора [83]. Использование воздуха в качестве плазмообразующего газа имеет два положительных момента- позволило отказаться от использования более дорогостоящих инертных газов (азот, аргон, неон) и способствовать эффективному выгоранию капель распыленного масла, подаваемого в разряд [33, 67, 84, 85, 86].

Одним из ответственных узлов СВЧ плазменного анализатора, определяющим надежность его работы, аналитические и диагностические возможности является устройство распыления и подачи пробы масла в разряд. Задача оказалась нетривиальной [87, 88], однако успешно решена на уровне изобретения при непосредственном участии автора настоящего диссертационного исследования [84, 85].

Еще одной длительное время не решаемой проблемой являлся способ выделения и регистрации аналитического сигнала.

В известных работах по измерению параметров металлической примеси [89, 90] используемая аппаратура выделяет и регистрирует только импульсную составляющую сигнала, где размер металлических частиц в пробе превышает 2 мкм. В случае нахождения частиц в пробе в виде металлоорганической примеси, либо в виде частиц, размер которых не инициирует импульсный сигнал (размер частиц менее 2 мкм), вклад таких частиц в общее содержание может быть определяющим и не учитывается при расчете массовой доли, чем вносится существенная погрешность в измерения. В настоящей работе за счет разработанной в соавторстве схемы динамической регистрации сигнала, решена задача получения количественных результатов определения содержания в смазочных маслах независимо от формы нахождения металлической примеси в пробе масла [67]. При этом, удалось получить отдельную информацию для одного и того же элемента, содержащегося в пробе в виде присадки и частиц изнашивания

Разработанная конструкция СВЧ плазменного анализатора позволяет одновременно измерить параметры частиц следующих элементов – Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Ag, V, Cu, Mo, Ti, Mn.

При использовании аналитической навески в 1 мл анализатор за время 10 минут выдает следующую информацию:

- содержание элемента, находящегося в пробе масла в виде частиц изнашивания (размер частиц более 2 мкм);
- содержание элемента, растворенного в масле и (либо) содержащегося в виде субмикронных частиц (размер частиц менее 2 мкм);
- число «простых» частиц, состоящих только из одного элемента;
- число «сложных» частиц, состоящих из двух и более элементов;
- общее число частиц износа;
- средний размер частиц данного элемента;
- элементный состав каждой износной частицы.

Для оценки технического состояния двигателя разрабатывалась статистическая эталонная модель исправного двигателя [33].

Модель формировалась с учетом типа и диапазона наработок исправных двигателей, находящихся в эксплуатации. Понятно, что исправные двигатели данного типа и диапазона наработок характеризовались разбросом параметров, образующимся в результате различия износа двигателей, который, в свою очередь, зависел от условий их эксплуатации, качества сплавов, качества изготовления деталей, качества сборки и т.д. Погрешность результатов анализа также вносила свой вклад в значение σ . Согласно формальному сложению дисперсий [33, 76]:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{износа}}^2 + \sigma_{\text{анализа}}^2 \quad (4)$$

где σ^2 – дисперсия распределения параметров для исправных двигателей, $\sigma_{\text{износа}}^2$ – дисперсия распределения параметров, образующихся за счет износа двигателя, $\sigma_{\text{анализа}}^2$ – дисперсия, характеризующая погрешность анализа.

Опыт оценки технического состояния узлов трения авиационных двигателей показал, что точности результатов СВЧ плазменных измерений достаточно для достижения цели, даже если результат измерений взят как среднее из двух параллельных измерений, т.е. всегда $\sigma_{\text{износа}}^2 > \sigma_{\text{анализа}}^2$. Учитывая сказанное, можно утверждать, что в диапазон результатов измерений от нуля до верхней границы $(\bar{x} + \sigma)$ входят 68% всех исправных двигателей. В диапазон до верхней границы $(\bar{x} + 2\sigma)$ входят 97% исправных двигателей, а за диапазоном $(\bar{x} + 3\sigma)$ исправные двигатели практически отсутствуют [33].

Необходимо подчеркнуть следующее. Граничные значения, устанавливаемые с помощью предложенного подхода, являются до некоторой степени условными, поскольку граница предотказного состояния, в общем случае, может не совпадать с граничным значением, полученным по исправным двигателям [33]. Поэтому рассчитанные ранее граничные значения по статической модели исправного двигателя каждый раз уточнялись и уточняются в настоящей работе по мере накопления статистики гарантированно исправных двигателей.

3.2. Краткая характеристика и возможности микрорентгеноспектрального метода

В микрорентгеноспектральном (электронно-зондовом) анализе рентгеновское излучение в исследуемом образце возбуждают электронным пучком. Для идентификации элементов, содержащихся в образце, и определения их массовой доли измеряют длину волны и интенсивность соответствующей линии рентгеновского спектра. Основное достоинство метода – возможность локального определения химического состава – реализуется благодаря использованию электронного пучка, сфокусированного в узкий зонд [91, 92].

Каждый микроанализатор снабжен оптическим микроскопом. Оптический микроскоп необходим оператору для визуального выбора интересующих его участков поверхности образца и сопоставления результатов анализа с видимой микроструктурой. Для общего обзора поверхности достаточно небольшого увеличения ($\times 100$), более тонкие детали наблюдаются с увеличением 250-500 крат. Для некоторых образцов желательно иметь возможность излучения поверхности в поляризованном и проходящем свете.

Полученные результаты представляются в виде снимков областей поверхности подложки (рисунок 3.1).

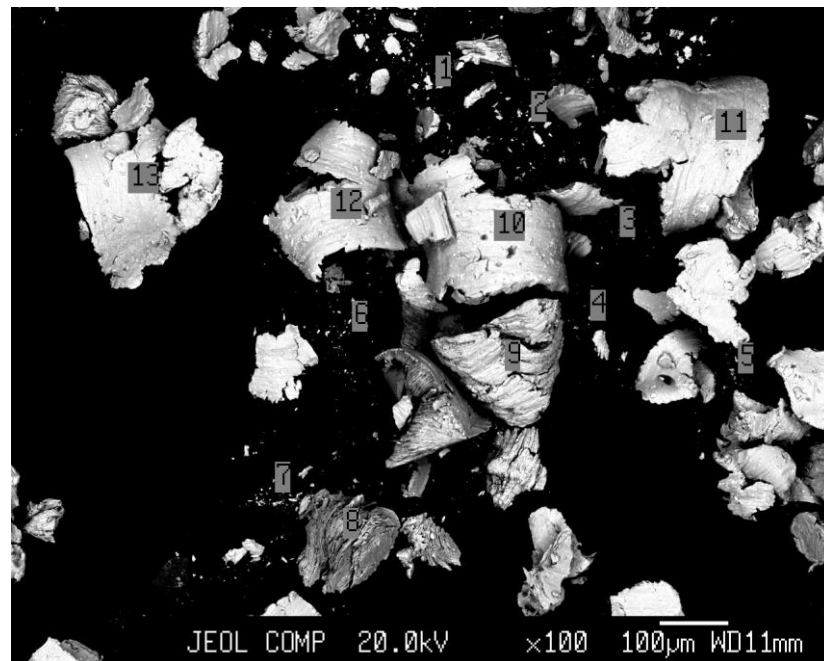


Рисунок 3.1 – Снимок области подложки с частицами при увеличении в 100 раз

В нижнем правом углу рисунка представлены данные о том, при каких условиях был сделан снимок, так же прилагается масштабная линейка, при помощи которой можно оценить размер интересующей частицы.

Некоторые частицы помечены маркером. С каждой помеченной частицы получен спектр (рисунок 3.2).

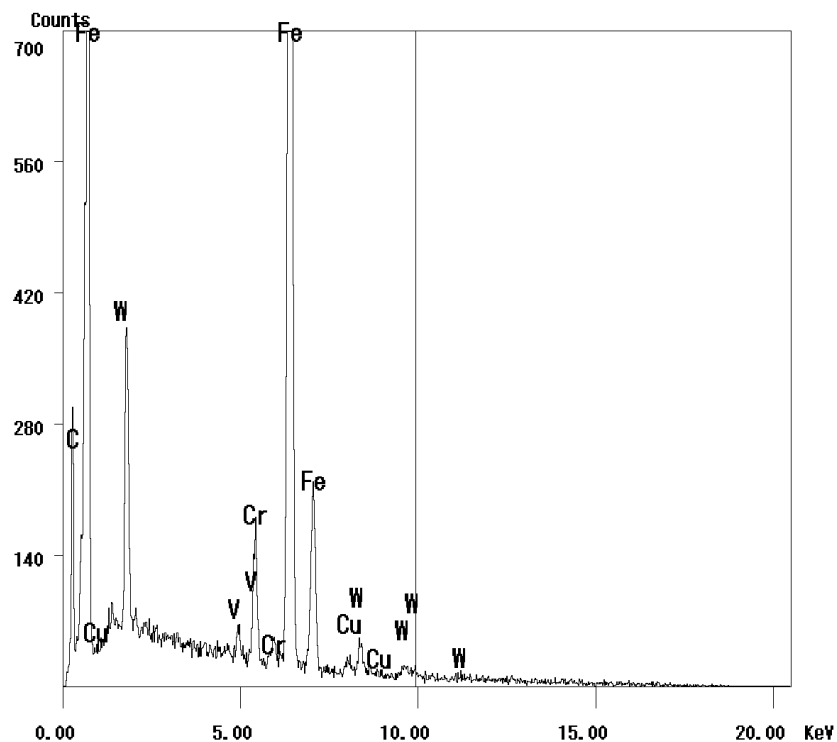


Рисунок 3.2 – Спектр исследуемой частицы

Каждый полученный от частицы спектр сопровождается его расшифровкой. В расшифровке указывается информация, с помощью которой можно идентифицировать исследуемую частицу: ее элементный состав и массовое содержание того или иного элемента (содержание рассчитывается методом фундаментальных параметров) [93].

Для идентификации параметров частиц методом электронно-зондового микроанализа необходимо удалить масляную пленку с частиц изнашивания. В противном случае масляная пленка не позволит качественно закрепить частицу на подложке из углеродного скотча и в процессе вакуумизации прибора (микрорознда) исследуемый материал будет потерян. Подготовка проб для проведения микрорентгеноспектральных измерений проводилась согласно методике, приведенной в работе [94]. Измерения размеров частиц проводились на микрорентгеноспектральном анализаторе JXA-8000.

3.3. Распределение частиц по размерам в исправных двигателях и двигателях с повреждениями

3.3.1. Распределение частиц по размерам в исправных двигателях

В работе [6, 39, 95] сообщается, что важной характеристикой износных процессов является размер частиц. Считается, что размер частиц позволяет оценить серьезность повреждения, скорость износа и тип изнашивания.

Границу распределений по размерам частиц, которая характеризует исправные (поврежденные) двигатели разные авторы оценивают по-разному. В работах [52, 80] считается, что в исправных двигателях размер частиц не должен превышать 5 мкм. В работе [39] считается, что двигатель неисправен при размерах частиц более 30 мкм. Однако имеются сведения, что при размерах отдельных

частиц изнашивания порядка 600 мкм двигатель может продолжать эксплуатацию [10, 54, 60-62].

При этом, экспериментальные данные в названных работах по оценке вида распределений частиц по размерам в исправных двигателях и двигателях с повреждениями отсутствовали.

Для проведения исследований ПАО «ОДК-Сатурн» предоставило пробы смывов с основного маслофильтра двигателей Д-30КП2, отобранных после проведения ПСИ с наработкой в диапазоне ~4-7 часов. Также исследована проба с двигателя ПД-14, проходившего стендовые испытания.

Двигатели Д-30КП2 были отправлены в эксплуатацию. Двигатель ПД-14 после стендовых испытаний замечаний не имел. Поэтому рассмотренные двигатели считались исправными.

Распределения частиц по размерам по результатам микрорентгеноспектральных измерений представлены на рисунках 3.3-3.6.

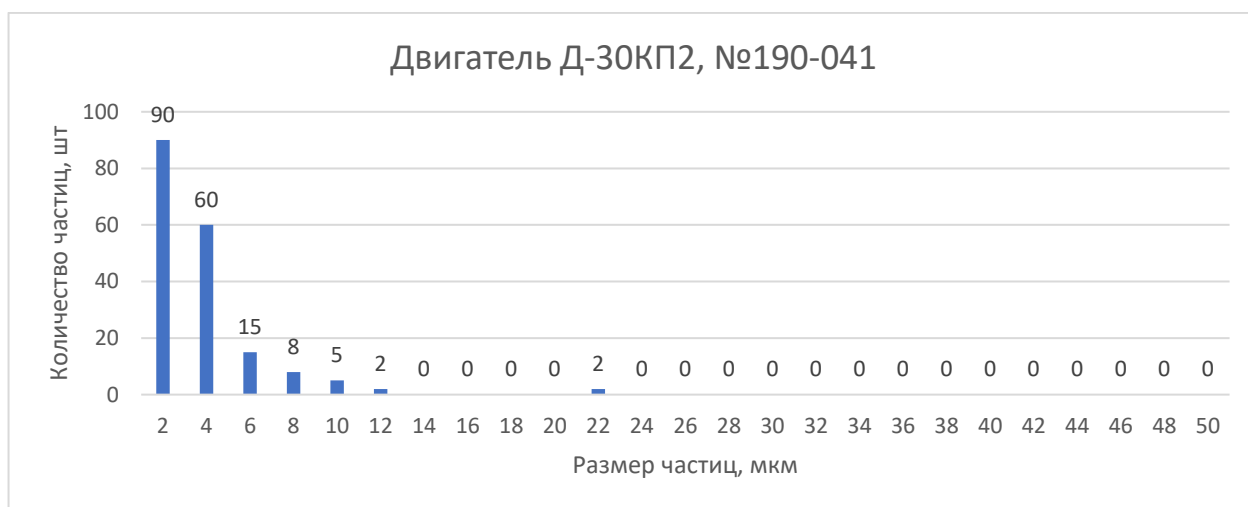


Рисунок 3.3 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП2 №190-041 после ПСИ. Нарботка ППР – 5 часов 29 минут

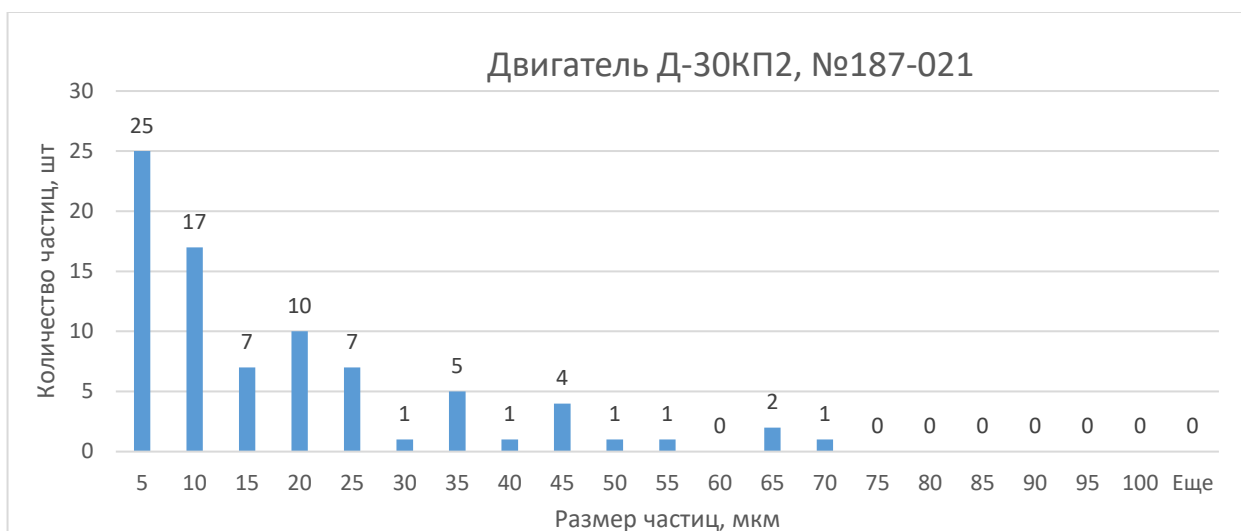


Рисунок 3.4 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП2 №187-021 после ПСИ. Нарботка ППР – 7 часов 4 минуты

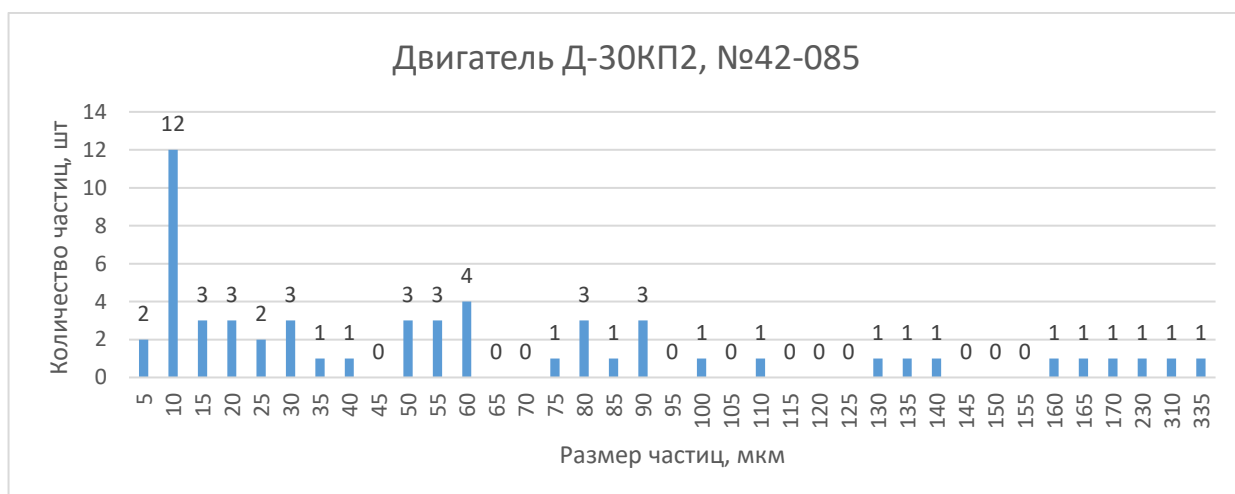


Рисунок 3.5 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП2 №42-085 после ПСИ. Нарботка ППР – 6 часов 13 минут

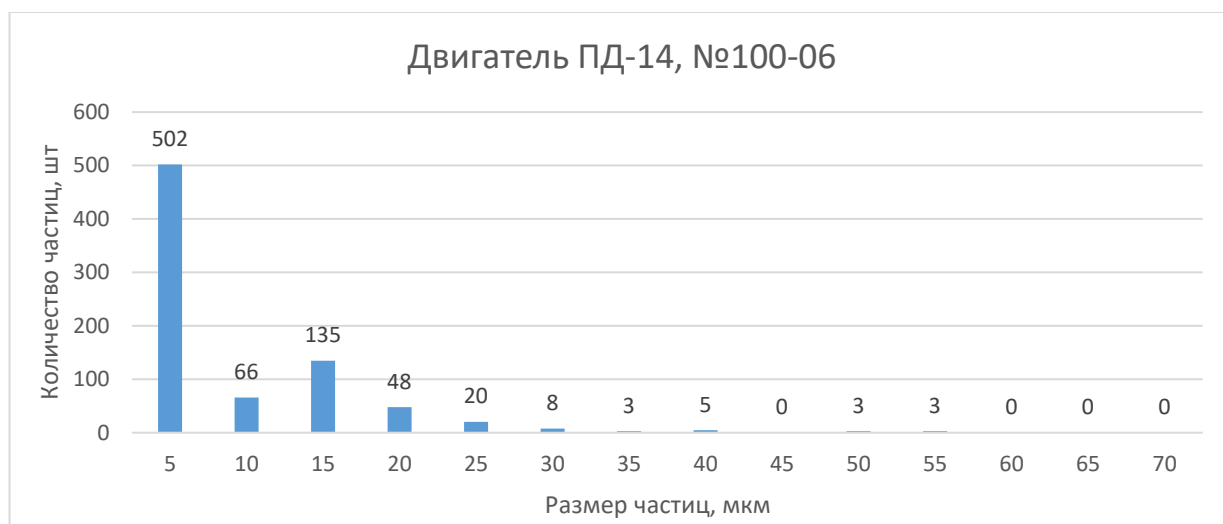


Рисунок 3.6 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с фильтроэлемента Pall QA 09237 исправного двигателя ПД-14 №100-06 после стендовых испытаний

Для двигателей Д-30КП2 (рисунки 3.3-3.5), при сравнительно близких значениях наработки ППР, распределения по форме значительно различаются. Так, для двигателя №190-041 правая сторона распределения заканчивается на размерах частиц 15-20 мкм, в то время как для двигателя №42-085 встречаются единичные частицы размером до 335 мкм. Возможно, это связано с оставшейся в двигателе технологической стружкой после его промывки.

В двигателе ПД-14 №100-06 (рисунке 3.6) более 95% измеренных частиц находится в диапазоне размеров 5-20 мкм, оставшиеся 5% частиц занимают диапазон размеров от 20 до 55 мкм.

Показанные результаты демонстрируют, что учет при принятии диагностического решения всего одного параметра «размер частиц» может привести к принятию недостоверного диагностического решения. Например, в двигателе №42-085 максимальный размер частиц составил после ПСИ 335 мкм, в двигателе №189-021 размер частиц после ПСИ оказался меньшим – 115 мкм. Принимая во внимание только абсолютный размер крупных частиц можно сделать вывод, что техническое состояние двигателя №189-021 по сравнению с двигателем №42-085 лучше. К сожалению, двигатель №42-085 до сих пор находится в резерве.

В двигателе №189-021 при наработке ППР 403 часа произошло разрушение роликоподшипника ТВД.

Приведенный выше иллюстративный материал показывает, что при принятии диагностического решения недостаточно учитывать только диагностический параметр «размер частиц», необходимо выявить и учитывать другие параметры.

3.3.2. Распределение частиц по размерам при повреждении коробок приводов и центрального привода

На рисунках 3.7 и 3.8 представлены распределения частиц при повреждении коробки приводов двигателей Д-30КУ №391-213 и Д-30КП2 №394-097. На рисунках 3.9-3.10 изображены распределения частиц при повреждении узлов центрального привода двигателя ПС-90А №31-040 и двигателя АИ-24 №423-095.

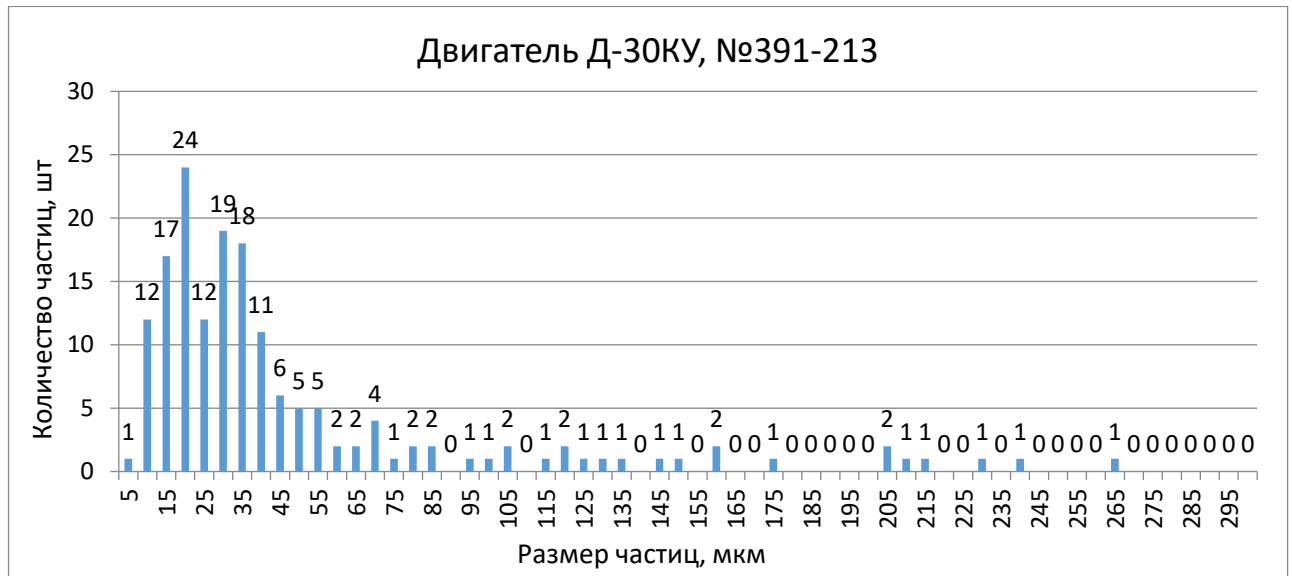


Рисунок 3.7 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра двигателя Д-30КУ №391-213 при повреждении коробки приводов.

Наработка ППР – 410 часов

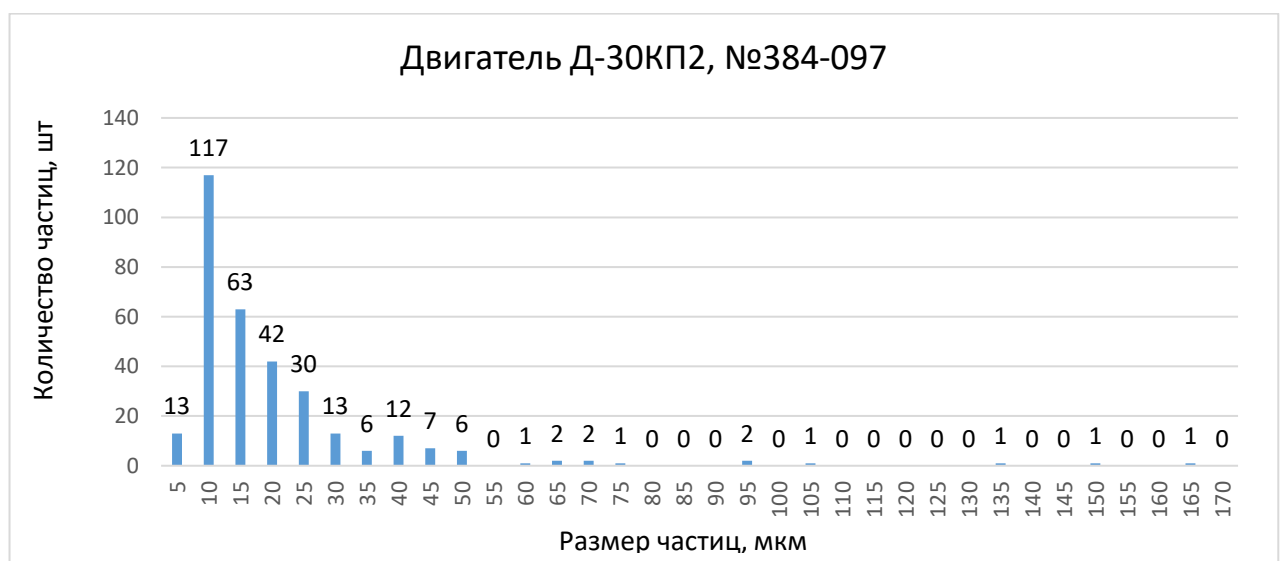


Рисунок 3.8 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра двигателя Д-30КП2 №384-097 при повреждении коробки приводов.

Наработка ППР – 1233 часа

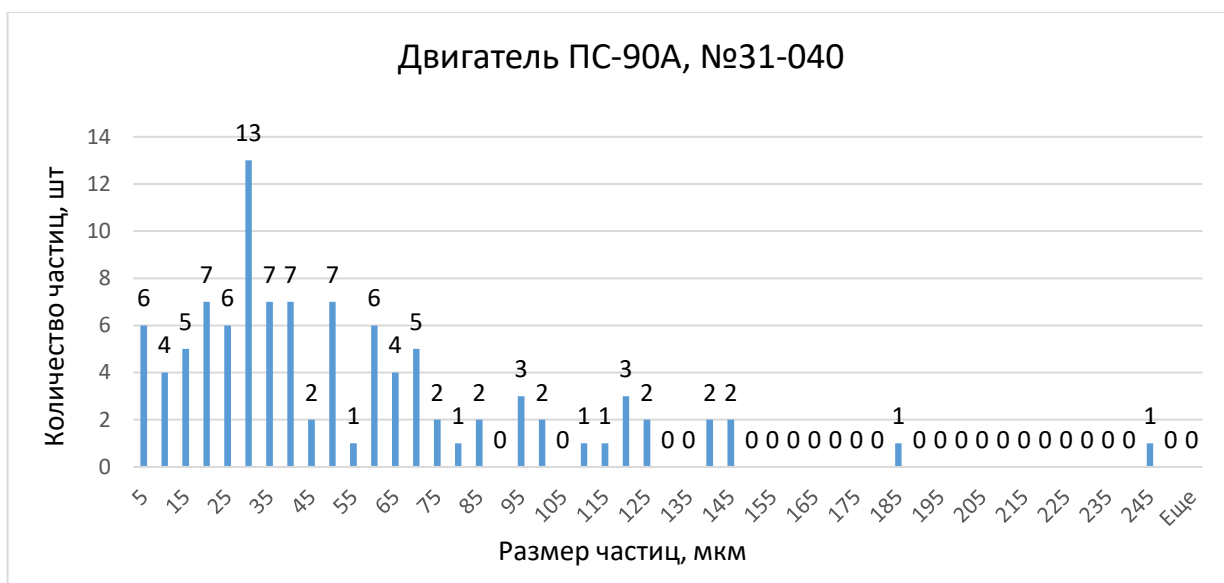


Рисунок 3.9 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с фильтроэлемента двигателя ПС-90А №31-040 при повреждении центрального привода. Нарботка ППР – 1640 часов

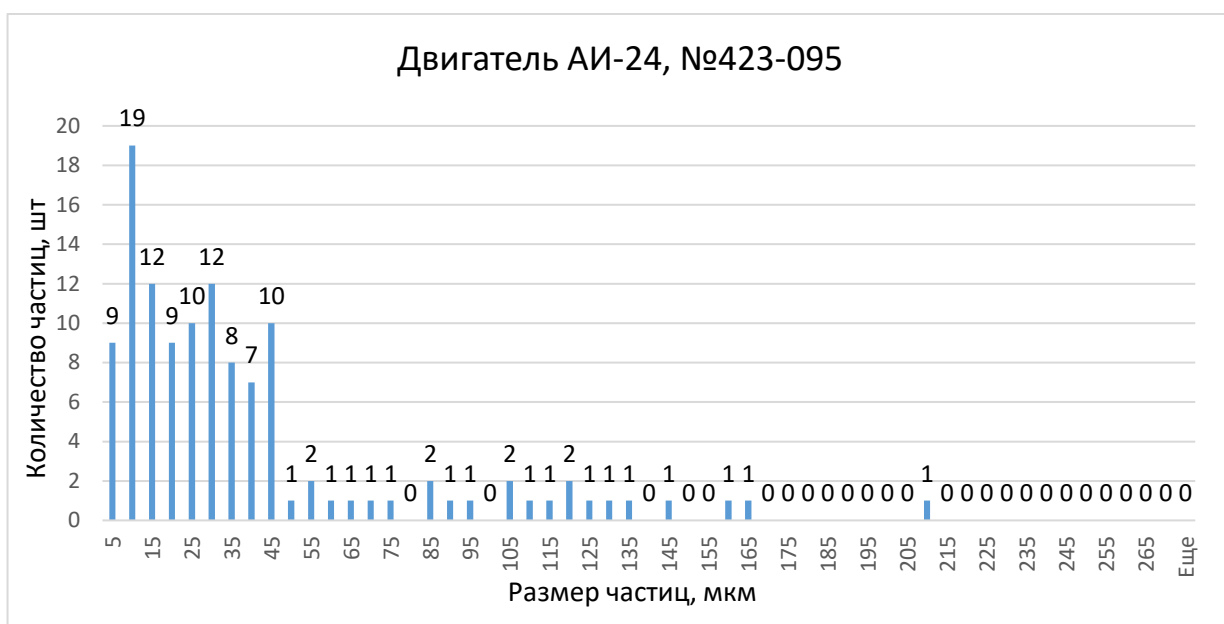


Рисунок 3.10 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра двигателя АИ-24 №423-095 при повреждении центрального привода. Нарботка ППР – 3164 часа

Для двух конструктивно схожих двигателей №391-213 и №384-097 (рисунки 3.7 и 3.8) при повреждении узлов в коробке приводов основное количество частиц сосредоточено в диапазоне размеров от 5 до 60-70 мкм. Однако в обоих двигателях встречаются крупные единичные частицы размером свыше 150 мкм.

Аналогичная картина наблюдается в двигателях ПС-90А и АИ-24 (рисунок 3.9 и 3.10). Здесь также основная доля частиц сосредоточена в классах от 5 до 60-70 мкм. В правой части распределения обнаруживаются единичные крупные частицы размером свыше 150 мкм.

Приведенные сведения на рисунках 3.7-3.10 еще раз показывают, что диаграммы распределений двигателей с повреждением деталей в коробках приводов фактически не отличаются от диаграмм распределений исправных двигателей (рисунок 3.3-3.6). Поэтому при принятии диагностического решения недостаточно учитывать параметр «максимальный размер частиц».

3.3.3. Распределение частиц по размерам при повреждении роликоподшипника турбины высокого давления и лабиринтного уплотнения

На рисунках 3.11-3.12 для двигателя Д-30КП2 №189-021 приведены распределения частиц по размерам при анализе пробы смыва с МФС и ЦВС при повреждении роликоподшипника турбины высокого давления.

На рисунках 3.13-3.14 приведены распределения частиц по размерам для двигателей ПС-90А №72-196 и Д-30КП2 №43-079 при повреждении роликоподшипника ТВД.

На рисунке 3.15 показано распределение для двигателя Д-30КП2 №22-069 при повреждении лабиринтного уплотнения.

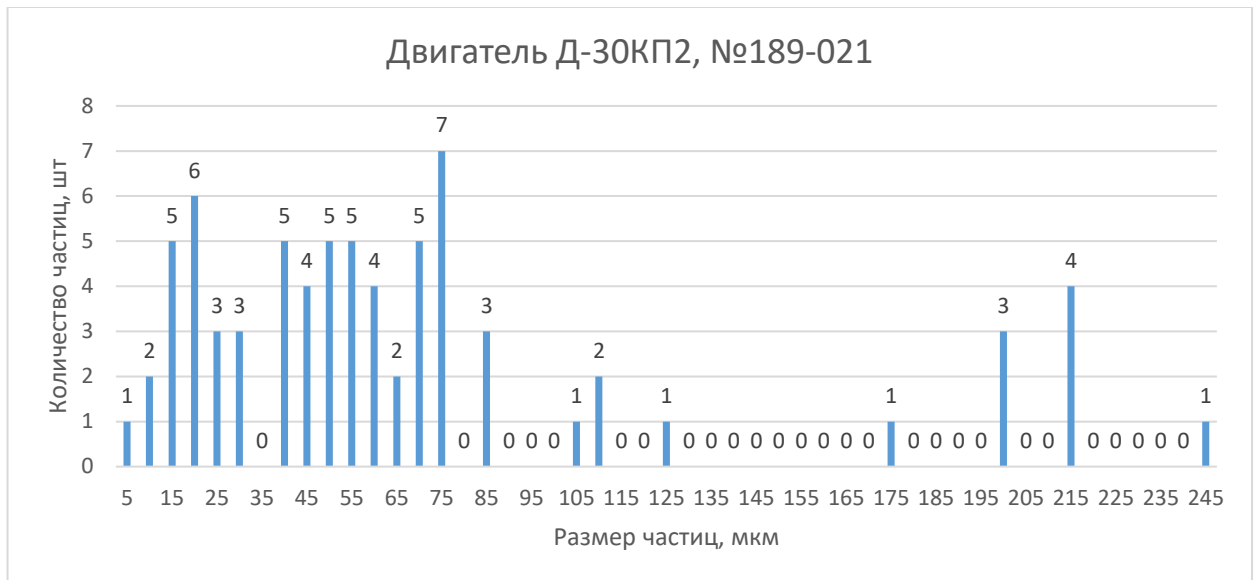


Рисунок 3.11 – Диаграмма распределения частиц по размерам в двигателе Д-30КП2 №189-021 при повреждении роликоподшипника ТВД. Нарботка ППР – 403 часа, смыв с ЦВС

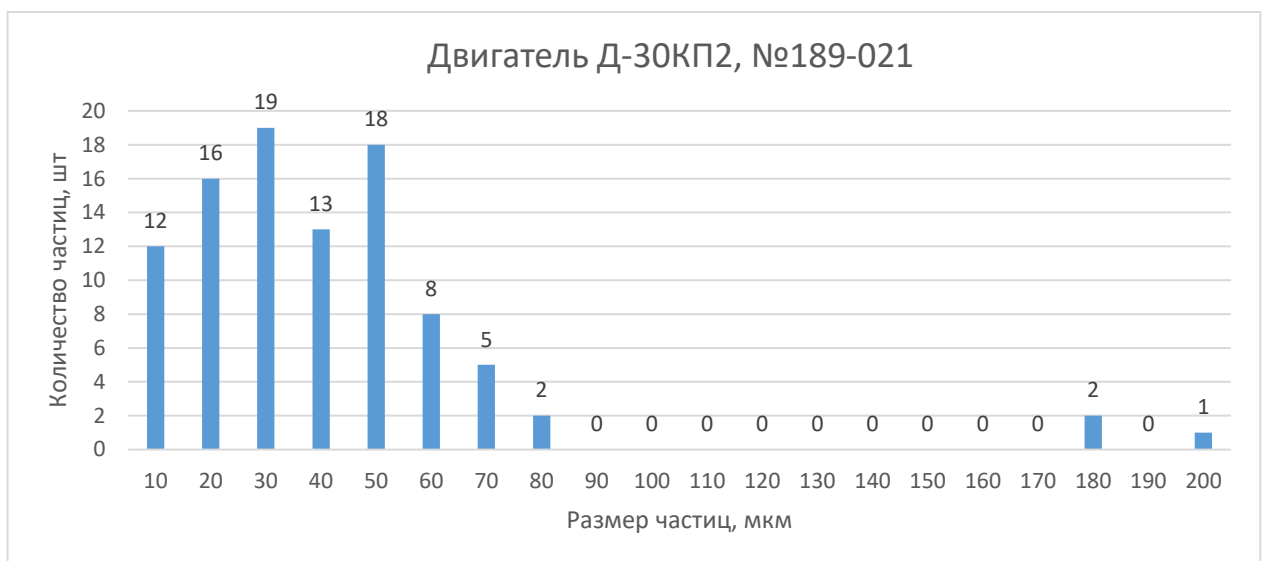


Рисунок 3.12 – Диаграмма распределения частиц по размерам в двигателе Д-30КП2 №189-021 при повреждении роликоподшипника ТВД. Нарботка ППР – 403 часа, смыв с МФС

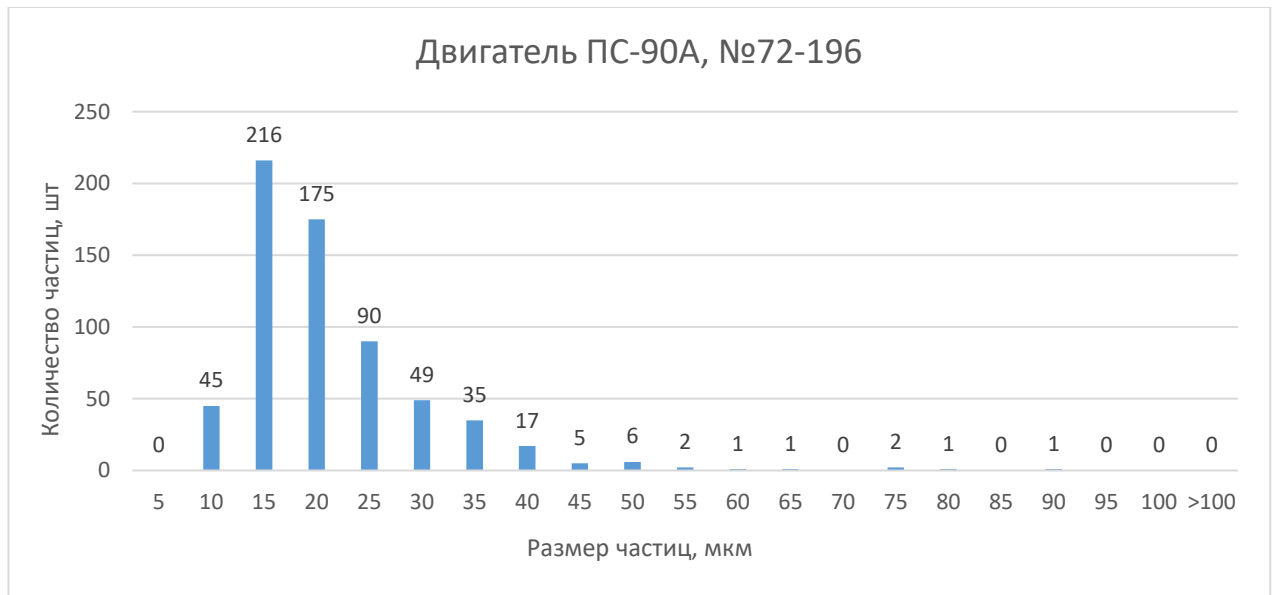


Рисунок 3.13 – Диаграмма распределения частиц по размерам в двигателе ПС-90А №72-196 при повреждении роликоподшипника ТВД при стендовых испытаниях.

Наработка ППР – 15 циклов, проба смыва с фильтроэлемента



Рисунок 3.14 – Диаграмма распределения частиц по размерам в двигателе Д-30КП2 №43-079 при повреждении роликоподшипника ТВД. Наработка ППР – 1554 часа, проба смыва с маслофильтра



Рисунок 3.15 – Диаграмма распределения частиц по размерам в двигателе Д-30КП2 №22-069 при повреждении лабиринтного уплотнения. Нароботка ППР – 166 часов, проба смыва с маслофильтра

Из представленных рисунков видно, что в зависимости от типа и серьезности повреждения форма диаграмм меняется. Так, при проскальзывании роликов подшипника ТВД мотора ПС-90А №72-196 (рисунок 3.13) максимальное количество частиц сосредоточено в классах размером до 60 мкм и мало отличается от распределения частиц для исправного двигателя №187-021 (рисунок 3.4).

Из рассмотренных выше случаев повреждений роликоподшипника ТВД на рисунке 3.14 показано еще одно распределение. Это единственный нами наблюдаемый случай, когда основная часть частиц изнашивания сдвинута вправо и сосредоточена в диапазоне размеров от 90 до 230 мкм. В данном двигателе произошло разрушение роликоподшипника ТВД со сколом борта. Максимальный размер частиц составил более 600 мкм.

Таким образом, вид распределений частиц по размерам коррелирует с техническим состоянием узлов, омываемых смазочным маслом только при значительном повреждении узла. При менее значительных повреждениях распределения частиц по размерам неотличимы от распределений исправного двигателя.

3.3.4. Влияние вида распределения частиц по размерам на определение повреждений СВЧ плазменным методом

В Приложении А приведены протоколы (№1-3) СВЧ плазменных измерений двигателя Д-30КУ №391-213 для ПКП, ЗКП и смыва с маслофильтра. Напомним, что в Д-30КУ использовали маслофильтр МФС-30 с тонкостью фильтрации 75 мкм. При использовании такого сравнительно крупноячеистого маслофильтра необходимо при принятии диагностического решения учитывать результаты измерений проб масел с передней коробки приводов (ПКП) и задней коробки приводов (ЗКП).

Результаты показали, что параметры «количество частиц» и «массовая доля» по Fe и Cu выходят за уровень $\bar{x} + 3\sigma$, параметры уровня $\bar{x} + 3\sigma$ имеют частицы Fe-Cu, Cu-Ag, характеризующие износ сепаратора подшипников. Причем, в ПКП и ЗКП величины содержаний Fe и Cu с точностью погрешности измерений оказались одинаковыми. Это означает, что большая часть частиц прошла беспрепятственно через маслофильтр, поэтому превышение рейтингов в пробе смыва с МФС относительно контрольных значений не наблюдается.

Двигатель №391-213 в рамках исполнения бюллетеня №1772-БД-Г [91] исследовался при наработках ППР 34, 60, 65, 269 и 410 часов. За время наблюдения до наработки ППР 410 часов параметры частиц в пробе смыва не превышали контрольных значений, небольшие превышения фиксировались только в коробках приводов. При ППР 410 часов в пробе смыва контрольные значения превысили размер частиц по хрому и $V_{\text{эле}}^{\text{м}}$ по ванадию (уровень $\bar{x} + 2\sigma$). Было принято решение по замене коробок приводов. Результаты заводских исследований – повышенный износ 40% подшипников. Причина: в масляной среде посторонние

частицы твердого характера, дефект производственный (Заключение №44-516335 от 11.08.2005). Таким образом, двигатель №391-213 по результатам СВЧ плазменных измерений удерживался на крыле в течение 376 часов, начиная от зарождения повреждений и заканчивая повреждением беговых дорожек и сепараторов подшипников. При этом развитие повреждения уверенно отслеживалось на всех этапах исследований.

В Приложении Б в трех протоколах (№4-6) приведены результаты измерений параметров частиц двигателя Д-30КП-2 №384-097 в коробках приводов и смыве с МФС.

В отличие от результатов измерений предыдущего двигателя №391-213, в пробе смыва двигателя №384-097 количество частиц ванадия и сложных частиц состава Ni-Cu оказалось на уровне $\bar{x} + 3\sigma$, достаточном для досрочного съема двигателя (ДСД). Значение рейтинга частиц состава Fe-Cu показало уровень $\bar{x} + 2\sigma$ (особый контроль). Понятно, что при таком уровне параметров дальнейшая эксплуатация двигателя недопустима.

Высокие уровни параметров частиц для данного двигателя наблюдаются в коробках приводов. Здесь уровень $\bar{x} + 3\sigma$ в передней коробке приводов показывает количество частиц Cr, Fe, V. Содержание железа в ПКП составило 4,54 г/т, при этом большая доля (3,57 г/т) представлена в виде частиц размером менее 2 мкм. Значительно ниже по сравнению с ПКП зарегистрировано количество частиц железа и ванадия в ЗКП. Однако, уровни параметров по числу частиц и содержанию этих элементов указывают на ДСД.

Высокие параметры частиц хрома и железа, обнаружение ванадия, а также высокий уровень частиц Fe-Cu (характеризующих износ сепаратора/ов) в пробе масла с ПКП свидетельствуют о разрушении подшипника, изготовленного из стали ЭИ-347Ш. Результаты заводских исследований показали повышенный износ роликов межвального роликоподшипника и подшипников коробок приводов¹.

¹ Заключение №44-538704 от 16.08.2017

В Приложении В, в протоколах №7-8 представлены параметры частиц изнашивания двигателя ПС-90А №31-040. На анализ поступила проба масла, слитая с КП и проба смыва с фильтроэлемента PALL QA-07930 с тонкостью фильтрации 15 мкм. Характерной особенностью в двигателях ПС-90А при анализе результатов пробы масла, отобранной с КП, является малое количество зарегистрированных частиц и низкие параметры частиц изнашивания по сравнению с двигателями Д-30КП2.

Эксплуатантом были обнаружены частицы на магнитной пробке (МП) коробки приводов в виде волосовидной стружки 2,5 мм и 3 мм – 2 шт. На ФСС обнаружена немагнитная чешуйчатая стружка размером 0,5 мм на 0,5 мм – 5 шт. Спектральный анализ (БАРС) показал содержания на уровне $C_{Fe}=1,1$ г/т, $C_{Cu}<1$ г/т.

Результаты СВЧ плазменных измерений пробы масла с КП двигателя №31-040 показали, что параметры частиц находятся на уровне «холостых» значений.

Результаты анализа проб смыва свидетельствуют о высоком уровне рейтинга магния (уровень ДСД), соотношение рейтингов Fe и Cu указывают на повышенное количество частиц Fe в пробе смыва.

Двигатель был снят с крыла. Результаты заводских исследований показали смещение шестерни центрального привода (ЦП) и ее задевание о корпус.

Протокол №9 (Приложение Г) показывает результаты СВЧ плазменных измерений параметров частиц двигателя №72-196 ПС-90А после стендовых испытаний. В лабораторию поступила диагностическая лента с фильтроэлемента PALL после 15 цикла испытаний. Проба масла с КП отсутствовала.

Из протокола видно, что рейтинг по Cr и Ni, а также рейтинги «сложных» частиц имеют низкие значения, значительно ниже границы $\bar{x} + 2\sigma$. Единственным параметром, указывающим на съём двигателя с крыла, является общий рейтинг и рейтинг «простых» частиц серебра (уровень более $\bar{x} + 3\sigma$).

Опыт использования СВЧ плазменного анализатора для диагностических целей показал, что чаще всего повышенные параметры серебра связаны с медью. Это характеризовало повреждение бронзового сепаратора подшипника с

нанесенным подслоем серебра. В таких случаях на первом месте среди сложных частиц всегда находилось соединение Cu-Ag с рейтингом не менее 23.

В работе [45] обнаружение повреждения сепаратора с нанесенным подслоем серебра позволило решить следующую задачу. Долгое время проблемой являлось выявление повреждения подшипника 4¹/₂ двигателя J52P408 на ранней стадии развития по результатам атомно-эмиссионных измерений и сопровождение его до предотказного состояния. Была разработана специальная технология и выяснено, что предвестником разрушения является повышенное количество серебра в пробе смыва, которое характеризовало повреждение сепаратора, вызывающее, в дальнейшем, повреждения непосредственно подшипника. Разработанная технология выявления повреждения сепаратора позволила с достоверностью 90% выявлять повреждение на ранней стадии развития подшипника 4¹/₂ и сопровождать его до предотказного состояния [45].

Возвращаясь к двигателю ПС-90А №72-196 можно отметить следующее. После стендовых испытаний двигатель был исследован и обнаружено проскальзывание роликов подшипника ТВД. Вполне вероятно, что начальное повреждение роликоподшипника ТВД также определяют высокие рейтинги серебра в пробе смыва. Поэтому выяснение роли и количества серебра при возникновении повреждения роликоподшипника ТВД планируется исследовать в дальнейшей работе.

В Приложении Д в протоколах №10-12 и рисунке 3.16 приведены результаты измерений параметров частиц изнашивания для двигателя Д-30КП2 №189-021 после проведения ПСИ.



Рисунок 3.16 – Диаграмма размеров частиц по размерам в двигателе Д-30КП-2 №189-021 после проведения ПСИ. Смыв с МФС-30. Нарботка ППР – 6 часов 30 минут

Из рисунка 3.16 видно, что правый «хвост» распределений заканчивается на размерах частиц 118 мкм. При этом, количество составов сложных частиц равно 55 (Приложение Д, протокол №10).

Уровень рейтингов в пробе смыва имеет низкие значения, значительно ниже контрольного значения $\bar{x} + 2\sigma$ (особый контроль).

В ПКП и ЗКП (Приложение Д, протоколы №11-12) невелико количество частиц по всем элементам. В ПКП содержание алюминия составило 2,08 г/т, что для двигателя после ПСИ связано, вероятнее всего, с приработкой либо оставшейся технологической стружкой.

Наблюдается низкий уровень рейтингов составов сложных частиц. На первом месте среди сложных частиц находится соединение Cu-Ag, что связывается с некритичным износом посеребренных сепараторов подшипников.

На рисунке 3.12 для этого же двигателя приведено распределение частиц по размерам для пробы смыва с МФС-30 при наработке двигателя ППР 403 часа, при котором сработало табло «Стружка в масле».

Сравнивая диаграммы результатов распределений частиц по размерам после ПСИ и при наработке 403 часа (рисунок 3.12) видно, что максимальное количество частиц приходится на первые классы. После ПСИ наблюдаются единичные

частицы размером до 140 мкм, того же порядка (до 200 мкм) наблюдаются частицы после срабатывания табло «Стружка в масле». Иными словами, вид распределений не позволяет сделать однозначный вывод о повреждении узлов маслосистемы двигателя при ППР 403 часа.

В протоколе №13 Приложения Е представлены результаты измерений параметров частиц двигателя №189-021 при наработке ППР 403 часа.

Сравнивая протоколы измерений параметров частиц, полученных СВЧ плазменным методом после ПСИ и при наработке ППР 403 часа видно их значительное различие. Так, если в протоколе после ПСИ ни один параметр не превысил значения $\bar{x} + 2\sigma$ (особый контроль), то при наработке ППР 403 часа наблюдаются повышенные рейтинги по железу, хрому и ванадию (уровень $\bar{x} + 3\sigma$, ДСД). Уровень ДСД показывает рейтинги сложных частиц Fe-Cr, Fe-Ag, Fe-Cr-Cu, Cr-Fe-Ag, Fe-Cr-Cu-Ag.

При уровне рейтингов $\bar{x} + 3\sigma$ по ванадию и сложным частицам вывод однозначный – повреждение роликоподшипника ТВД.

Проблема повреждения узлов маслосистемы двигателей Д-30КП/КУ при наработках ППР до 500 часов известна и до конца не решена. Например, аналогичная ситуация приведена для двигателя №291-213, имевшего повышенные параметры при ППР 34 часа и снятого с крыла при ППР 410 часов. Поэтому возникает вопрос о возможности выявления диагностических параметров, характеризующих начало развития повреждения при проведении ПСИ с целью недопущения инцидентов в эксплуатации.

Из представленных результатов по двигателю №189-021 видно, что параметры распределений частиц по размерам после ПСИ и при ППР 403 часа не слишком различаются. Максимальный размер частиц составил порядка 200 мкм. Более того, в двигателе №42-085 после ПСИ зарегистрированы отдельные частицы размером 335 мкм. Поэтому обнаружение таких частиц после ПСИ должно быть дополнено другими характерными признаками.

Однако обнаружение даже единичных крупных частиц являетсястораживающим признаком. Обращаясь к протоколу СВЧ плазменных

измерений параметров частиц после ПСИ (Приложение А, протокол №3) видно, что ни один из параметров не превысил значения $\bar{x} + 2\sigma$ («особый контроль»). Тем не менее, в коробках приводов на первом месте среди сложных частиц находится соединение Cu-Ag, характеризующее износ сепараторов.

Связывая полученные результаты для двигателя №189-021 после ПСИ с результатами диагностики, показанными выше для двигателя ПС-90А №31-040, можно предположить, что наличие частиц Cu-Ag, возможно, является признаком раннего выявления повреждения. Понятно, что данный вопрос дискуссионный и требует дальнейшего изучения.

Таким образом результаты проведенных экспериментов свидетельствуют:

—в исправных двигателях функция распределения частиц по размерам имеет логнормальный вид, и граница правой стороны распределения может доходить до нескольких сотен микрометров. Утверждение о том, что в исправных двигателях размер частиц не превышает 5 мкм должно быть скорректировано на реальные размеры. Это 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.

—в двигателях с повреждением распределение частиц по размерам может быть неотличимо от распределения частиц, характерного для исправного двигателя (рисунки 3.5 и 3.16), основное количество частиц сосредоточено в классах от единиц до 80 мкм. При повреждении узлов в этом классе увеличивается только их общее количество. Такой вывод позволяет обоснованно использовать в качестве дополнительного диагностического параметра рейтинги частиц изнашивания — доля количества частиц изнашивания определенного элемента (элементного состава частиц) к общему количеству зарегистрированных частиц.

—оценка технического состояния узлов трения по результатам анализа пробы масла не всегда показывает достоверные результаты в целом по двигателю. Поэтому, для повышения надежности результатов диагностирования необходимо анализировать как минимум две пробы — пробу масла и пробу смыва с

маслофильтра (фильтроэлемента). Как правило, повышенные результаты массовой доли в пробе масла свидетельствуют о повреждении узлов коробки(ок) приводов. В этом случае наблюдаются повышенные параметры и в пробе смыва с маслофильтра. Лишь в отдельных случаях, при значительном разрушении узла(ов), основное количество частиц в распределении сдвигается вправо и сосредоточено, например, в диапазоне от 80 до 220 мкм (рисунок 3.14).

—для двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154, оснащенных маслофильтром типа МФС-30 с ячейками 75 мкм, повреждение трансмиссионной части может быть обнаружено только в отдельных случаях по величине массовой доли в пробе масла при развитии повреждения, сопровождающегося выделением мелкодисперсных частиц. В этом случае величина массовой доли в пробе масла с ПКП, ЗКП и МБ будет характеризовать техническое состояние всего двигателя,

—высказано предположение, которое требует дальнейшего изучения, что одним из диагностических признаков для выявления повреждения на ранней стадии развития узлов маслосистемы может являться повышенный износ сепараторов подшипников, который выявляется по результатам СВЧ плазменных измерений.

3.3.5. Оценка связи между количеством составов «сложных» частиц, определенных СВЧ плазменным методом и техническим состоянием двигателя

Рассмотрим влияние вида полученных распределений на оценку технического состояния двигателей по результатам СВЧ плазменных измерений. Ниже, в Приложении Ж (протокол №14), Приложении И (протокол №15) и Приложении Б (протокол №6) приведены проколы результатов СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания двигателей Д-30КП2 №22-069, №187-021, №384-097 после ПСИ. Нарботка двигателей ППР составила от 7 до 1233 часов. Анализировались пробы смыва с маслофильтра МФС-30.

Из Приложения И видно, что количество зарегистрированных составов частиц, состоящих из двух и более элементов, оказалось различным. Например, в двигателе №187-021 количество составов «сложных» частиц равно 40, правый «хвост» распределения заканчивается при размерах 70 мкм. Для двигателя №22-069 количество составов равно 80, а правая сторона распределения фактически закачивается на размере 365 мкм (рисунок 3.15). Двигатель №384-097 оказался промежуточным, количество составов 40, размер частиц в распределении заканчивается на 165 мкм (рисунок 3.8).

Наблюдается следующая зависимость: чем сильнее распределение по размерам частиц сдвинуто вправо, тем больше регистрируется составов «сложных» частиц (в некоторых протоколах составы «сложных» частиц с рейтингом <1 не показаны). Количество составов «сложных» частиц характеризует наличие в пробе крупных частиц, чем больше составов «сложных» частиц, тем больше крупных частиц размером более 80 мкм находится в анализируемой пробе.

На рисунке 3.17 приведена диаграмма распределения исправных двигателей и двигателей с повреждением по количеству составов «сложных» частиц. Для

построения диаграммы использованы данные по результатам СВЧ плазменных измерений за 2018-2020 гг.

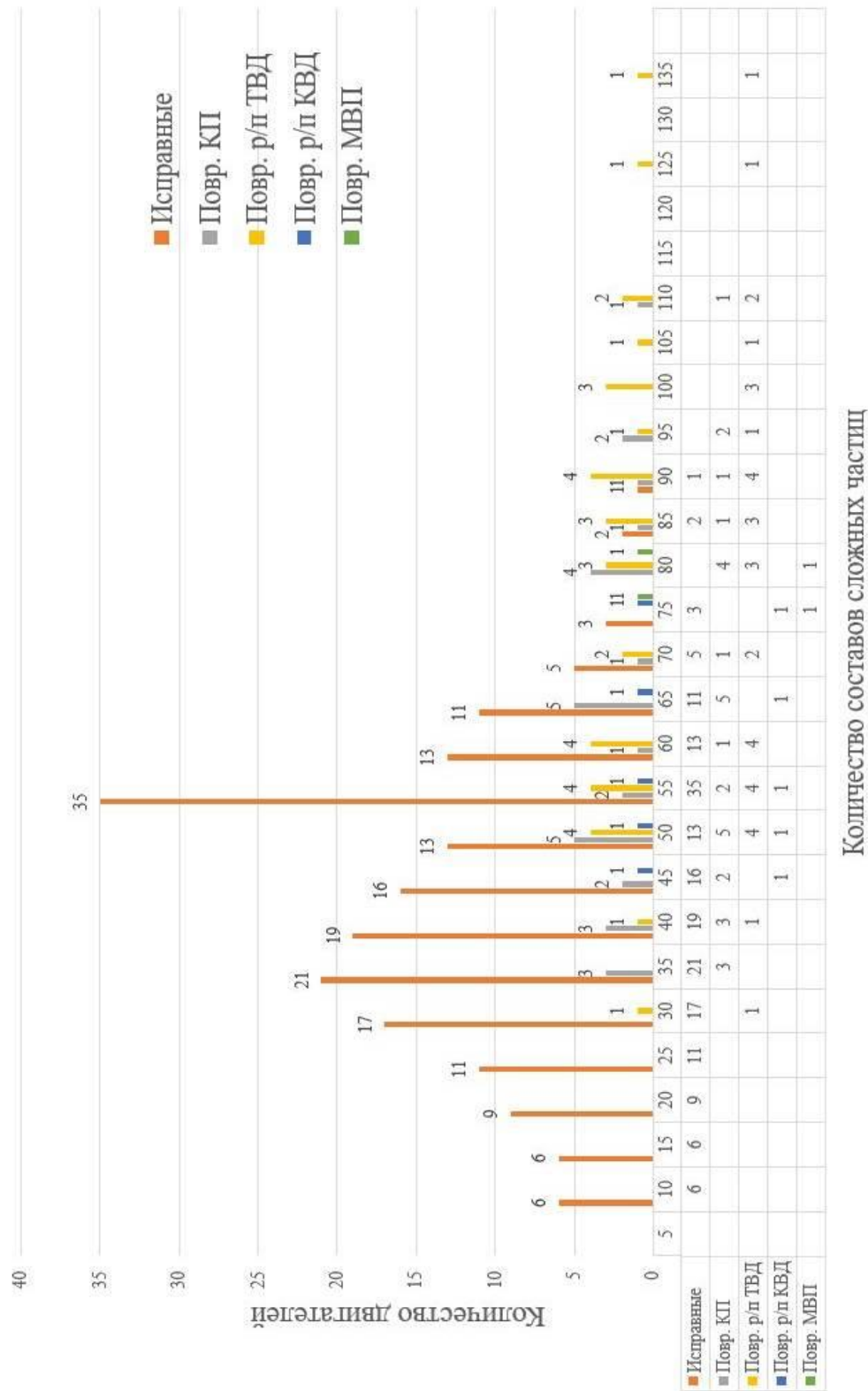


Рисунок 3.17 - Диаграмма распределения исправных двигателей и двигателей с повреждением в зависимости от количества составов «сложных» частей (G)

Как видно из рисунка 3.17, 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 3.17, 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 параметром может служить число составов «сложных» частиц, характеризующееся наличием крупных частиц в пробе.

3.4. Элементный состав частиц изнашивания по результатам микрорентгеноспектральных и СВЧ плазменных измерений

Ранее измерению элементного состава отдельных частиц изнашивания при оценке технического состояния узлов и деталей, омываемых маслом, авиационных двигателей не придавалось должного значения, поскольку используемое оборудование и все нормативные документы были ориентированы для измерения массовой доли двух элементов – Fe и Cu. С появлением и внедрением для диагностических целей современной рентгеноспектральной аппаратуры, позволяющей измерять массовую долю частиц 15-20 элементов, стало возможным измерение элементного состава отдельных частиц. Использование при определении марки сплава программы «Анализ стружки» позволило увеличить число двигателей, продолживших эксплуатацию после выявления фактов наличия стружки почти в четыре раза по сравнению с предшествующим периодом до применения программы [9]. Реальные размеры частиц изнашивания, при которых

данной программой могла быть определена марка сплава, составила более 500 мкм при измерениях на анализаторах типа «Призма» и «Спектроскан» [81]. Однако при таких размерах частиц наблюдались серьезные разрушения узлов. Для упреждения разрушения узлов ставилась задача измерения элементного состава частиц изнашивания меньших размеров.

Использование микроанализатора типа «Фокус-2» позволило измерять элементный состав частиц, изготовленных из эталонных сплавов, начиная с размеров 100-120 мкм [91]. Сообщение о применении данной методики на ранней стадии развития повреждения отсутствуют.

Реальный диапазон размеров частиц изнашивания, при которых СВЧ плазменные измерения показали высокую диагностическую достоверность, составил от единиц до 80 мкм. Понятно, что именно в этом диапазоне размеров должна быть обеспечена высокая правильность измерения элементного состава СВЧ плазменным способом. Способом проверки правильности измерения элементного состава СВЧ плазменным анализатором является сравнение полученных результатов с результатами других независимых методов. Для износных частиц сплавов, используемых в конструкции авиационного двигателя такие сведения отсутствуют. Поэтому для изучения частиц изнашивания размером от единиц до нескольких сотен мкм нами применялся микрорентгеноспектральный анализатор JXA8200. Результаты микроанализатора сравнивали с результатами измерений элементного состава, полученными на СВЧ плазменном спектрометре.

3.4.1. Элементный состав частиц изнашивания по результатам микрорентгеноспектральных измерений

В таблице 3.1 приведен фрагмент результатов микрорентгеноспектральных измерений элементного состава частиц изнашивания исправного двигателя Д-30КП2 №190-041, после проведения ПСИ [96].

Таблица 3.1 – Фрагмент результатов микрорентгеноспектральных измерений элементного состава частиц изнашивания исправного двигателя Д-30КП2 №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 ЭРСМА для 8 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
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

Продолжение таблицы 3.1

Fe _{0,1} C _{8,1} Cr _{0,1} O _{43,4} Ca _{3,8} Cu _{0,9} - Na _{4,2} Zn _{0,6} Si _{25,6} Mn _{0,2} Al _{12,5} Mg _{0,2}	Fe _{0,1} Cr _{0,1} Cu _{0,9} Na _{4,2} Zn _{0,6} - Mn _{0,2} Al _{12,5} Mg _{0,2}	FeCrCuAlMg
Fe _{36,8} C _{13,5} O _{33,9} Ca _{0,7} Cu _{1,6} Zn _{0,6} - Si _{5,9} V _{0,1} Mn _{0,1} Al _{5,5} Mg _{0,9} Ti _{0,1}	Fe _{36,8} Cu _{1,6} Zn _{0,6} V _{0,1} Mn _{0,1} - Al _{5,5} Mg _{0,9} Ti _{0,1}	FeCuVAlMg
Fe _{64,2} C _{18,7} W _{8,2} Cr _{3,4} O _{2,1} Cu _{0,9} - Zn _{0,6} Si _{0,2} V _{0,6} Ni _{0,2} Mn _{0,5} Ag _{0,4}	Fe _{64,2} W _{8,2} Cr _{3,4} Cu _{0,9} Zn _{0,6} - V _{0,6} Ni _{0,2} Mn _{0,5} Ag _{0,4}	FeCrCuVNiAg
Fe ₃₁ C _{30,37} W _{0,1} O _{3,7} Cu _{0,7} Zn _{0,5} - V _{0,2} Ag _{0,2}	Fe ₃₁ W _{0,1} Cu _{0,7} Zn _{0,5} V _{0,2} Ag _{0,2}	FeCuVAg
Fe _{68,6} C _{24,6} Cr _{0,9} O _{2,5} Cu _{2,5} Zn _{0,4} - Si _{0,2} Al _{0,1}	Fe _{68,6} Cr _{0,9} Cu _{2,5} Zn _{0,4} Al _{0,1}	FeCrCuAl
Fe _{70,1} C _{16,5} W _{5,8} Cr _{3,4} O _{0,5} Cu _{1,4} - Zn _{0,7} Si _{0,2} V _{0,7} Ni _{0,2} Mn _{0,3}	Fe _{70,1} W _{5,8} Cr _{3,4} Cu _{1,4} Zn _{0,7} - V _{0,7} Ni _{0,2} Mn _{0,3}	FeCrCuVNi
Fe _{0,2} C _{58,4} Cr _{0,2} O _{29,8} Cu _{1,3} Na _{0,5} - Zn _{0,5} Si _{8,1} Mn _{0,2} Al _{0,2} Co _{0,4}	Fe _{0,2} Cr _{0,2} Cu _{1,3} Zn _{0,5} Mn _{0,2} - Al _{0,2} Co _{0,4}	FeCrCuAl
Fe _{72,8} C _{13,6} W _{2,8} Cr _{3,7} O _{1,4} Cu _{0,8} - Zn _{2,1} V _{0,5} Ni _{0,7} Mn _{0,9} Co _{0,3} Mg _{0,1}	Fe _{72,8} W _{2,8} Cr _{3,7} Cu _{0,8} Zn _{2,1} - V _{0,5} Ni _{0,7} Mn _{0,9} Co _{0,3} Mg _{0,1}	FeCrCuVNiMg
Fe _{76,3} C _{6,3} W _{7,1} Cr _{4,1} O _{1,2} Cu _{1,5} - Zn _{0,6} Si _{0,2} V _{1,4} Ni _{0,4} Mn _{0,5} Al _{0,1}	Fe _{76,3} W _{7,1} Cr _{4,1} Cu _{1,5} Zn _{0,6} - V _{1,4} Ni _{0,4} Mn _{0,5} Al _{0,1}	FeCrCuVNiMgAl
C _{40,1} O _{0,9} Cu _{38,4} Zn _{19,8} Mn _{0,1} - Co _{0,1} Ti _{0,2}	C _{40,1} Cu _{38,4} Zn _{19,8} Mn _{0,1} Co _{0,1} - Ti _{0,2}	Cu

Примечание: в таблице 3.1 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 (ЭРСМА) для восьми элементов.

Для данного двигателя распределение частиц по размерам ограничено величиной 22 мкм (рисунок 3.4), что соответствует исправному состоянию двигателя.

Результаты таблицы 3.1 показывают, что частицы с составом, характерным для сталей (Fe, Cr, Ni, V), содержат не характерные элементы Cu, Zn, Al, Ag, Mg.

Такой состав, вероятно, связан с механическим образованием таких частиц при их генерации и/либо при их попадании в зазоры движущихся деталей узлов маслосистемы.

В таблице 3.2 приведены результаты фрагмента протокола микрорентгеноспектральных измерений элементного состава частиц изнашивания двигателя Д30КП №43-079 с повреждением.

Таблица 3.2 – Фрагмент результатов микрорентгеноспектральных измерений элементного состава частиц изнашивания двигателя Д-30КП2 №43-079 с повреждением

Элементный состав и измеренные доли элементов (мас.%) в частицах, по результатам микрорентгеноспектральных измерений	Размер частиц, мкм	Состав частиц, измеренный ЭРСМА для 8 элементов (Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V)
Cr14,8Fe67,8W0,8Ni1,6Mn0,7Cu2,2Si1,1Zn1,3	10	CrFeNiCu
Cr5,4Fe0,6V0,9Ni,24Cu3,4Si7,9Zn9,4	15	CrFeNiCuV
Cr0,4Fe94W0,7Ni0,7Cu1,5Zn1,4	24	CrFeNiCu
Cr9Fe79W2,4V0,3Ni2,2Mn1,5Cu2,8Si0,3Zn2,1	44	CrFeVNiCu
Cr2Fe42W3,1V1,0Mn1,3Cu42,5Si0,2Zn0,7	80	CrFeVCu
Cr4Fe79,8W12,9V1,3Mn0,2Si0,5Zn0,8	658	CrFeV
Cr10,6Fe78,1W6,4V1,1Ni0,8Mn0,7Si0,6Zn0,8	150	CrFeVNi
Cr4,9Fe85,4W6,1V1,2Si0,7Zn0,6	187	CrFeVNi
Cr4,6Fe86,2W6,2V1,5Si0,3Zn0,3	356	CrFeV
Cr9,8Fe78,8W1,6V0,5Ni1,9Mn0,3Cu2Si0,6Zn2,4	28	CrFeVNiCu
Cr4,8Fe74,1W16,5V1,3Ni0,2Mn0,8Si0,4	187	CrFeVNi
Cr8,4Fe65,3W0,4Ni2,5Mn0,7Cu4,1Si2,7Zn1,1	16	CrFeNiCu
Cr4,7Fe71W2V1,6Ni0,6Mn1,2Cu3Si0,2Zn1,5	83	CrFeVNiMnCu
Cr9Fe69,1W1,1V0,3Ni1,2Mn0,8Cu12,1Si0,5Zn0,2	101	CrFeVNiMnCu
Cr4,8Fe90,8W0,2V1,1Mn0,9Cu0,4Zn0,6	171	CrFeVCu
Cr3,8Fe51,4W35,9V1,8Mn0,3Cu0,2Si1,2Zn0,8	239	CrFeVCu
Cr3,8Fe83,1W8,4V1,4Ni0,1Mn0,7Si0,2Zn0,8	123	CrFeVNi

В двигателе Д-30КП-2 №43-079 произошло разрушение подшипника ТВД со сколом борта, обнаружены частицы размером до 658 мкм (таблица 3.2). По составу практически все частицы содержат элементы, входящие в состав стали ЭИ-347Ш,

из которой изготовлен подшипник ТВД. Согласно паспортному составу, сталь ЭИ-347Ш содержит Fe=82%, Cr=4,5%, W=9%, V=1,5%, Ni<0,3%, Mo<0,3%, Mn<0,4%.

Из таблицы 3.2 видно, что измеренный состав частиц не совпадает с паспортным значением стали. Так, изменение содержания железа в разных частицах колеблется от 0,6% до 90%, вольфрама от 0,4% до 35,9%, ванадия от 0,3% до 1,8% и т.д. Таблица также свидетельствует, что стальные частицы содержат частицы меди, цинка и кремния.

В таблице 3.3 приведен фрагмент результатов микрорентгеноспектральных измерений элементного состава частиц изнашивания двигателя Д-30КП2 №22-069 с повреждением.

Таблица 3.3 – Фрагмент результатов микрорентгеноспектральных измерений элементного состава частиц изнашивания двигателя Д-30КП2 №22-069 с повреждением [97]

Элементный состав и измеренные доли элементов (мас.%) в частицах, по результатам микрорентгеноспектральных измерений	Размер частиц, мкм	Состав частиц, измеренный ЭРСМА для 8 элементов (Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V)
1	2	3
Si0,35Cr0,7Fe54,3Mn0,4Ni1,6Cu1,1Zn1,3-C40,3	Cr0,7Fe54,3Mn0,4-Ni1,6Cu1,1Zn1,3	CrFeNiCu
Si0,5Ni54,2Cu6,8Zn0,7C31,9O5,9	Ni54,2Cu6,8Zn0,7	NiCu
Ni45,3Cu4,2Zn1,0C45,2O4,3	Ni45,3Cu4,2Zn1,0	NiCu
Si17,5Al4,0Fe2,5Mg1,4Ca0,3Na3,7K0,2-Co22,3Cu0,3Zn0,3O47,6	Al4,0Fe2,5Mg1,4-Co22,3Cu0,3Zn0,3	AlFeMgCu
Ni76,2Cu12,6Zn0,6O10,7	Ni76,2Cu12,6Zn0,6	NiCu
Ti70,9Al7,1	Ti70,9Al7,1	Al
Si1,8Ni32,2Cu11,4Zn0,8C34,3O19,5	Ni32,2Cu11,4Zn0,8	NiCu
Ni59,4Cu3,6Zn0,8C28,7O7,5	Ni59,4Cu3,6Zn0,8	NiCu
Ni52,5Cu2,6Zn1,1C34,6O8,6	Ni52,5Cu2,6Zn1,1	NiCu
Mg16,7Ca16,6Co33,3O33,4	Mg16,7Co33,3	Mg
Si3,6Ni25,9Cu17,6Zn0,1C24,6O28,1	Ni25,9Cu17,6Zn0,1	NiCu
Ca0,2Ni25,3Cu18Zn0,8C31,4O21,1	Ni25,3Cu18Zn0,8	NiCu
Cr1,1Ca0,7Na0,9Cu1Zn0,7Cd24,6C14,9O54,3	Cr1,1Cu1Zn0,7Cd24,6	CrCu
Ni73,7Cu3,4Zn2,2O16,8	Ni73,7Cu3,4Zn2,2	NiCu
Ti13,3Al1,7Ni0,1Zn0,2C42	Ti13,3Al1,7Ni0,1Zn0,2	AlNi
Al0,7Mg0,7Ca0,5Na0,9Ni3,4Cu1,7Zn0,2-C23,7O28,4	Al0,7Mg0,7Ni3,4-Cu1,7Zn0,2	AlMgNiCu
Cr0,9Fe65,4Mn0,3Ni2,1Cu1,4Zn1,1C27,6	Cr0,9Fe65,4Mn0,3-Ni2,1Cu1,4Zn1,1	CrFeNiCu
Cr1,1Fe59,7Mn0,3Ni1,4Cu1,2Zn0,9C35,4	Cr1,1Fe59,7Mn0,3-Ni1,4Cu1,2Zn0,9	CrFeNiCu

Продолжение таблицы 3.3

Cr _{1,2} Fe _{64,4} Mn _{0,2} Cu _{1,4} Zn _{0,8} C _{28,6} O _{3,0}	Cr _{1,2} Fe _{64,4} Mn _{0,2} - Cu _{1,4} Zn _{0,8}	CrFeCr
Si _{1,4} Cr _{0,9} Fe _{70,4} Mn _{0,4} Cu _{1,2} Zn _{0,4} C _{25,3}	Cr _{0,9} Fe _{70,4} Mn _{0,4} - Cu _{1,2} Zn _{0,4}	CrFeCu
Cr _{0,5} Fe _{31,9} Mn _{0,2} Ni ₁ Cu _{0,7} Zn _{0,7} C _{52,7} O _{10,8}	Cr _{0,5} Fe _{31,9} Mn _{0,2} - Ni ₁ Cu _{0,7} Zn _{0,7}	CrFeNiCu
Si _{1,4} Fe ₅₅ Cu _{1,3} C ₃₂ O _{10,3}	Fe ₅₅ Cu _{1,3}	FeCu
Ni _{38,6} Cu _{24,7} Zn _{1,7} C _{31,0} O _{4,0}	Ni _{38,6} Cu _{24,7} Zn _{1,7}	NiCu
Si _{2,1} Ti ₁ Al _{10,7} Cr _{9,7} Fe _{35,6} Mn _{1,4} Ni _{5,1} - Zn _{0,5} O _{29,4}	Ti ₁ Al _{10,7} Cr _{9,7} Fe _{35,6} Mn _{1,4} Ni _{5,1} Zn _{0,5}	CrFeNi
Si _{0,6} Cr _{0,5} Fe _{39,9} Ca _{0,1} Ni ₁ Cu _{0,9} Zn _{0,7} C _{52,5} - O _{3,8}	Cr _{0,5} Fe _{39,9} Ni ₁ - Cu _{0,9} Zn _{0,7}	CrFeNiCu
Si _{0,6} Cu _{39,3} Zn _{4,5} Sn _{2,3} C _{46,1} O _{7,2}	Cu _{39,3} Zn _{4,5} Sn _{2,3}	Cu
Si _{0,5} Cr _{0,7} Fe _{53,9} Mn _{0,3} Ni _{1,6} Cu ₁ Zn _{0,5} C _{41,6}	Cr _{0,7} Fe _{53,9} Mn _{0,3} - Ni _{1,6} Cu ₁ Zn _{0,5}	FeNiCu
Fe _{0,2} Ni ₃₉ Cu _{23,5} Zn _{0,9} C _{33,4} O _{2,9}	Fe _{0,2} Ni ₃₉ Cu _{23,5} - Zn _{0,9}	FeNiCu

В двигателе Д-30КП-2 №22-069 произошло повреждение лабиринтного уплотнения, максимальный размер частиц достигает 365 мкм (таблица 3.3). В данном двигателе в полете сработало табло «Стружка в масле».

При изготовлении лабиринтных уплотнений используется сталь 15Х1М1Ф (Fe=96%, Cu=0,3%, V=0,25%, Mo=1%, Cr=1,2%, Ni<0,25%, Mg=0,5%) и сплав (Ni=15%, Cr=20%, Cu=65%).

Таблица 3.3 также показывает, что результаты микрорентгеноспектральных измерений выявили преобладающий состав Ni-Cu, характеризующий повреждение лабиринтных уплотнений [97], из которых следует:

— 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. Например, в двигателе №43-079 при разрушении роликоподшипника ТВД изменение содержания железа в разных частицах колеблется от 0,6% до 90%, вольфрама от 0,4% до 35,9%, ванадия от 0,3% до 1,8%, при паспортных значениях состава стали ЭИ-347Ш Fe=82%, Cr=4,5%,

W=9%, V=1,5%, Ni<0,3%, Mo<0,3%, Mn<0,4%. Возможно, что неоднородный состав стали ЭИ-347Ш явился причиной разрушения подшипника в полете;

—при нормальном и повышенном износах стальных деталей, обнаруживаются частицы изнашивания, содержащие Cu, Mg, Al и т.д. Обнаружение частиц с составом, не соответствующим типу сплава (например, FeNiCuMg, AlNiMgFe, и т.д.), вероятнее всего, связано с механическим соединением нескольких отдельных частиц изнашивания при протекании износных процессов;

— в исправных двигателях и двигателях с повреждениями обнаруживаются «простые» частицы, состоящие из одного элемента, как правило, представляющие основу сплава (Cu, Fe, Al, Mg). При этом размер частиц может составлять от единиц до нескольких десятков мкм;

—для двигателей, имеющих повреждение какого-либо узла, в составе частиц изнашивания обнаруживается превалирующий тип частиц со схожими составами. Очевидно, чем больше выявлено частиц определенного состава, тем выше степень изношенности узла.

3.4.2. Сравнительные результаты СВЧ плазменных и микрорентгеноспектральных измерений параметров частиц изнашивания в двигателях ПС-90А и Д-30КП-2

Для выполнения данной части работы требовалось решение нескольких задач:

— сравнить соответствие результатов микрорентгеноспектральных измерений с СВЧ плазменными;

— объяснить регистрацию большого количества одноэлементных «простых» частиц при выполнении СВЧ плазменных измерений;

— показать диагностическую значимость измерения элементного состава частиц изнашивания для выявления поврежденного узла и величины его повреждения.

Пробы, проанализированные на микрорентгеноспектральном анализаторе (раздел 3.3.1), были также проанализированы на СВЧ плазменном анализаторе. В Приложении К представлен протокол №17 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе смыва с МФС двигателя Д-30КП-2 №190-041.

В таблице 3.1 в правом столбце приведены данные микрорентгеноспектральных измерений для восьми элементов, которые измеряются СВЧ плазменным анализатором (Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V). Поэтому ниже сравниваются данные микрорентгеноспектральных измерений для 8 элементов с данными, полученными на СВЧ плазменном анализаторе.

В результатах микрорентгеноспектральных измерений в 73 из 121 частиц встречается ванадий, но его содержание только в 3 случаях превышает 1%. По результатам СВЧ плазменных измерений ванадий не был обнаружен. Это объясняется тем, что максимальный размер частиц изнашивания не превышает 22 мкм и более 90% частиц, согласно рисунку 3.4, сосредоточены в классах до 8 мкм. Исходя из этого, отсутствие частиц ванадия в результатах СВЧ плазменных измерений объясняется недостаточным пределом обнаружения СВЧ плазменного анализатора при содержании ванадия в частицах менее 1%.

Сравнение результатов микрорентгеноспектральных и СВЧ плазменных измерений, приведенных в таблице 3.1 и протоколе №17 Приложения Л показывает, что при измерении составов частиц данными методами присутствуют соединения типа Al-Mg, Fe-Cr-Cu, Fe-Cu, Cr-Ni-Fe-Cu-Al-Mg, обнаруживаются «простые» частицы меди, алюминия.

Отсюда следует, что наблюдается качественное совпадение по элементному составу, измеренному микрорентгеноспектральным и СВЧ плазменным методами.

В Приложении Л приведен протокол №16 СВЧ плазменных измерений смыва с маслофильтра двигателя Д-30КП2 №22-069 с повреждением лабиринтного уплотнения.

По результатам, представленным в таблице 3.3 и в протоколе СВЧ плазменных измерений (приложение Л, протокол №16) видно качественное и количественное совпадение результатов по всем составам частиц изнашивания. Все соединения, определенные СВЧ плазменным методом, присутствуют и в результатах микрорентгеноспектральных измерений. На первом месте в обоих случаях находится соединение Ni-Cu, ответственное за повышенный износ лабиринтного уплотнения.

Результаты микрорентгеноспектральных измерений показали, что действительно, 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.

С другой стороны, ограниченное количество элементов, регистрируемое СВЧ плазменным методом, по сравнению с микрорентгеноспектральным, приводит к тому, что при СВЧ измерениях регистрируется неполный состав частицы. В результате, если имеется частица с составом Cu-Sn-Zn, то СВЧ плазменным методом она регистрируется как одноэлементная медная частица.

Ниже, в таблице 3.4 в левом столбце приведены результаты микрорентгеноспектральных измерений для исправного двигателя ПС-90А, в правом столбце - результаты, имитирующие измерения элементного состава СВЧ плазменным методом.

Таблица 3.4 – Сравнение результатов измерения элементного состава микрорентгеноспектральным методом с измерениями, имитирующими СВЧ плазменные

Элементный состав и измеренные доли элементов в частицах, по результатам ЭРСМА измерений, мас. %	Размер частиц, мкм	Состав частиц, измеренный ЭРСМА для 8 элементов (Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V)
Pb(90,2%)Sn	10	-
O(45,4%)Si(33,7%)CaNaAlMg	2	AlMg
Cu(84,5%)Al	3	AlCu
Cu(93,7%)Sn	3	Cu
Fe(100%)	3	Fe
Fe(88,7%)SiCr	3	CrFe
Fe(73,4%)O(25,4%)SiMn	5	Fe
Fe(76,3%)Cr	5	CrFe
Fe(76,8%)	5	Fe
Ag(91%)OMg	5	AgMg
Fe(72,6%)AlMgCoMnNi	6	AlNiMgFe
Fe(99,6%)Si	6	Fe
Cu(54,2%)Zn(45,8%)	7	Cu
Cu(61,3%)Zn(35,6%)	7	Cu
Ni(62,7%)SiNa(5,1%)	7	Ni
Ti(20,2%)P(28,3%)Al(41,5%)	7	Al
FeO(35%)Si(27,3%)Mg(33,7%)	7	MgFe
Al(84,2%)O	7	Al
Fe(100%)	7	Fe
Fe(87%)OV(3,115%)	8	FeV
Fe(94,5%)O	8	Fe
Fe(89,4%)Cr	8	CrFe
Fe(99,3%)Si	10	Fe
W(62,5%)Zn(37,5%)	10	W
Ag(100%)	10	Ag
Ag(64,6%)SiO(29,3%)Al	10	AlAg
Fe(82%)O	10	Fe
Fe(70,9%)OSNaCa	10	Fe
Cu(62,7%)Zn(36,37%)	10	Cu
Fe(94,3%)SiCr	11	CrFe

Таблица 3.4 наглядно показывает, что при микрорентгеноспектральных измерениях (левый столбец) обнаруживаются единичные «простые» частицы металлов. В случаях измерений анализатором ограниченного количества элементов резко возрастает число «простых» одноэлементных частиц.

Отсюда следует, что обнаружение большого количества одноэлементных частиц при СВЧ плазменных измерениях связано с ограниченным количеством регистрируемых элементов. Поэтому эффективность диагностического параметра

$V_{\text{общ}}$ не может быть достаточной для вынесения достоверного диагностического решения. Должны быть применены дополнительные диагностические параметры.

Таким дополнительным диагностическим параметром является упомянутый выше параметр $R_{\text{сл}}$. В таблице 3.3 при микрорентгеноспектральном анализе частиц изнашивания двигателя №22-069 наиболее часто встречается состав Ni-Cu. В дополнение к таблице 3.3 на рисунке 3.18 для мотора №22-069 приведено распределение по долям вкладов различных составов частиц в их общее количество.

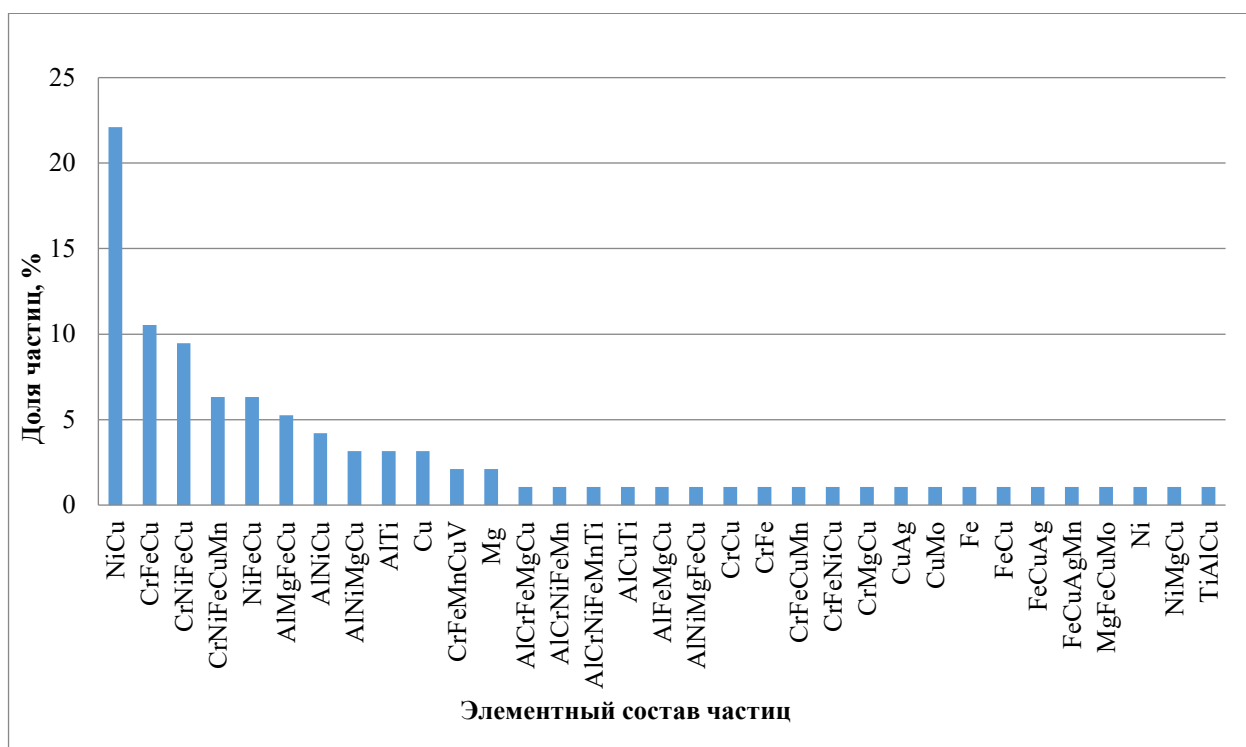


Рисунок 3.18 – Доли вкладов различных составов частиц в их общее количество в двигателе Д-30КП2 №22-069 с повреждением

Из рисунка 3.18 видно, что наибольший вклад вносят частицы состава Ni-Cu и Cr-Fe-Cu, характеризующие повреждение лабиринтного уплотнения. Обращаясь к протоколу СВЧ плазменных измерений двигателя №22-069 (Приложение Л) видно, что наибольшие рейтинги имеет соединение Ni-Cu. Составы частиц, приведенные в протоколе СВЧ плазменных измерений, полностью соответствуют составам, измеренным микрорентгеноспектральным методом [94, 97].

Исходя из идентичности составов, измеренных двумя методами, для диагностики предпочтительнее использовать СВЧ плазменный метод, вследствие большей статистической надежности полученных результатов и его экспрессности.

Выводы по главе 3

Анализ результатов проведенных измерений позволил получить несколько основных выводов:

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

—установлено, что в двигателях с повреждением распределение частиц по размерам может быть неотличимо от распределения частиц, характерного для исправного двигателя (рисунки 3.5 и 3.16). 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;

—по результатам микрорентгеноспектральных измерений установлено, что обнаружение большого количества одноэлементных «простых» частиц СВЧ плазменным методом связано с ограниченным количеством регистрируемых элементов. Поэтому при дальнейшем совершенствовании СВЧ плазменного анализатора необходимо увеличить количество определяемых элементов, что повысит правильность определения элементного состава частиц изнашивания.

Исходя из близости составов, измеренных СВЧ плазменным и микрорентгеноспектральными методами, для диагностики предпочтительнее использовать СВЧ плазменный метод ввиду большей статистической надежности и экспрессности результатов измерений;

—в исправных двигателях 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.

Обнаружение частиц с составом, не соответствующим типу сплава (например, Fe-Ni-Cu-Mg, Al-Ni-Mg-Fe, и т.д.), вероятнее всего, связано с механическим соединением нескольких отдельных частиц изнашивания при протекании износных процессов;

—для двигателей, имеющих повреждение какого-либо узла, в составе частиц изнашивания обнаруживается превалирующий тип частиц со схожими составами. Очевидно, чем больше выявлено частиц определенного состава, тем выше степень изношенности узла. Определив элементный состав частиц, можно с большой долей вероятности указать на поврежденный узел, даже если состав частиц не полностью соответствует определенному типу сплава. На практике большим количеством экспериментальных данных подтверждено, что дополнительным фактором степени изношенности узла является количество зарегистрированных «сложных» частиц изнашивания [16, 18]. Чем больше зарегистрировано «сложных» частиц, тем хуже состояние узлов двигателя.

—выявлена связь между количеством составов «сложных» частиц, зарегистрированных СВЧ плазменным методом и техническим состоянием двигателя. В двигателе 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 больше вероятностью имеет повреждение.

Глава 4. Методика оценки технического состояния маслосистемы двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154

4.1 Общие сведения

Полученные в главах 2 и 3 результаты позволили обоснованно выбрать эффективные диагностические параметры и разработать вариант методики оценки технического состояния двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154.

Методика прошла экспертизу в ГосНИИ ГА и утверждена первым заместителем генерального конструктора – главным конструктором ПАО «ОДК-Сатурн» (Приложение М).

Диагностирование двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 проводится по результатам измерения параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтра СВЧ плазменным комплексом, выполненного на основе сцинтилляционного анализатора САМ-ДТ-01-2 [98] или его последующих модификаций. Методика диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным комплексом (далее по тексту – Методика) определяет порядок проведения измерений параметров частиц изнашивания в пробах масел, отобранных с коробок приводов, в пробах смывов с основного маслофильтра МФС-30, и предназначена для оценки технического состояния омываемых маслом узлов и агрегатов указанных типов двигателей. Список регламентирующих документов, использованных при подготовке Методики, приведен в Приложении Н.

В Методике приведены следующие сведения:

4.1.1. Краткое описание СВЧ плазменного комплекса на основе сцинтилляционного анализатора САМ-ДТ-01-2 (далее анализатор) и измеряемых им параметров металлической примеси, отобранной из маслосистемы двигателя.

4.1.2. Порядок отбора проб в соответствии с разделом 4 Методики.

4.1.3. Порядок подготовки к анализу и процедуры измерения параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с фильтра МФС-30 осуществляется в соответствии с разделом 6.

4.1.4. Порядок, процедуры и периодичность метрологического обслуживания анализатора установлены в методике поверки МП 07-251-2016 [99].

4.1.5. Оформление результатов анализа производится в форме протокола, который автоматически заносится в базу данных анализатора и может быть выдан заказчику в электронном виде, либо твердой копии (например, Приложение А). В протоколе приводятся результаты измерений параметров частиц изнашивания, при этом автоматически сравниваются со статистической моделью и выделяются полужирным шрифтом параметры, превысившие уровень $\bar{x} + 2\sigma$, а серым фоном – предельный уровень $\bar{x} + 3\sigma$, соответствующие параметрам, приведенным в эталонной статистической модели исправного двигателя, построенной по результатам оценки параметров в большом количестве проб, отобранных из маслосистемы заведомо исправных двигателей данного типа с данной наработкой. В Приложении П, для примера, приведены таблицы статистической модели для двигателей Д-30КП/КП-2 с наработкой 1-500 часов ППР. Оператор, по результатам сравнения параметров в модели и исследованном двигателе делает диагностическое заключение, в котором кратко обосновывает наличие или отсутствие повреждения двигателя, и дает рекомендации о возможности его дальнейшей эксплуатации. Заключение заносится в Комментарий, который является неотъемлемой частью протокола и хранится вместе с цифровыми данными в базе анализатора.

4.1.6. Методика позволяет заблаговременно выявлять повреждения и неисправности узлов и агрегатов двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154, омываемых смазочным маслом. Достоверность оценки технического состояния двигателей и локализации выявленных повреждений составляет более 90% при условии, что выявленное повреждение встречалось ранее при выполнении бюллетеней [100-105] и было подтверждено заводскими исследованиями.

4.2 Принципы оценки технического состояния узлов, омываемых смазочным маслом, двигателей Д-30/КП/КП-2/КУ/КУ-154 по результатам анализа проб масел и смыва с маслофильтра МФС-30

Значения измеренных параметров частиц изнашивания, содержащихся в анализируемой пробе масла (смыве с МФС-30) диагностируемого двигателя - X_i сравнивают с соответствующими параметрами эталонных статистических моделей исправного двигателя данного типа и при данной наработке, для масла и смыва, соответственно.

Статистические модели для двигателей Д-30КП/КП2/КУ/КУ-154 при разных наработках ППР (1-5000 ч) строятся заблаговременно по результатам анализа большого числа проб, отобранных с заведомо исправных, не имеющих замечаний двигателей, находящихся в эксплуатации. Статистические модели введены в базу данных СВЧ плазменного комплекса и постоянно уточняются по результатам проанализированных проб с исправных двигателей данного типа.

Сравнение параметров происходит автоматически при формировании протокола результатов проанализированной пробы, при этом автоматически выделяются полужирным шрифтом параметры, превысившие уровень $\bar{x} + 2\sigma$ и серым фоном – предельный уровень $\bar{x} + 3\sigma$.

4.2.1. Статистические модели исправных двигателей для проб масел и смывов с МФС-30

В статистических моделях, рассчитанных и построенных по параметрам частиц изнашивания находящихся в пробах заведомо исправных двигателей, введены следующие обозначения: $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение параметра, σ – среднее квадратическое отклонение данного параметра, P – вероятность появления параметра в маслосистеме исправного двигателя, $\bar{x} + 2\sigma$ и $\bar{x} + 3\sigma$ – граничные значения параметров частиц изнашивания.

Статистическая модель исправного двигателя показывает, что при нормальном изнашивании в пробе масла присутствуют, в основном, «простые» одноэлементные частицы изнашивания, представляющие, как правило, основу сплава (частицы Fe, Cu, Al, Mg). При этом число «сложных» частиц на один-два порядка ниже, чем число «простых» частиц, вероятность появления «сложных» частиц с составом типа Fe-Cr-Ni, Fe-Cr-Ni-V, Fe-Ni, Cr-Ni и др. в пробе масла, характеризующих исправный двигатель, составляет $P < 0,1$.

С увеличением изнашивания вероятность появления «сложных» частиц и их количество увеличивается. При повышенном и тяжелом износе повышается количество частиц с составом типа Fe-Cr-Ni, Fe-Cr-Ni-V, Fe-Ni, Cr-Ni.

При анализе изменения параметров частиц изнашивания с наработкой двигателя регулярное появление таких частиц является признаком повышенного изнашивания, а повышение их числа признаком увеличения скорости развития износного процесса.

В зависимости от типа изнашивания, повышенные параметры частиц могут быть обнаружены в пробе масла, либо в пробе смыва с МФС-30 или в обеих пробах одновременно.

Диагностическим признаком, характеризующим повреждение подшипников, изготовленных из стали ЭИ-347-Ш, является наличие в пробе частиц ванадия (V).

В пробах масла и смыва с МФС-30 исправного двигателя ванадий не обнаруживается при наработке более 500 ч. Обнаружение ванадия в пробе масла, либо смыва с маслофильтра в двигателях Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 с наработкой ППР более 500 ч в количестве более 4 см^{-3} уже является признаком наличия повреждения [106].

4.2.2. Основные типы развития повреждений, выявляемые методикой диагностирования

В процессе эксплуатации двигателей возникают повреждения различных типов, которые в процессе их развития характеризуются различными схемами генерации частиц изнашивания.

Однако превалируют два пограничных типа, к которым можно свести, в той или иной степени, все остальные типы

—1 Тип. Развитие повреждения сопровождается выделением большого числа частиц в диапазоне размеров 0-15 мкм, которые беспрепятственно проходят через маслофильтр.

Пример: повышенный износ зубчатых колес – при этом типе повреждения наблюдается высокое содержание железа в масле, которое сосредоточено в частицах субмикронного размера – $C_{\text{раств}}$; параметры остальных элементов, в том числе сложных частиц, чаще всего, находятся в пределах нормы.

—2 Тип. Выкрашивание. Развитие повреждения происходит по схеме выкрашивания металла с тел качения и обойм подшипников с выделением крупных частиц, большинство которых задерживается МФС-30. Пример: повреждения подшипников трансмиссии ТВД, МВП, КВД.

В начальной стадии развития повреждения трансмиссионных подшипников двигателя, в пробе масла с коробок приводов, как правило, неисправность не обнаруживается. Повреждение обнаруживается по пробе смыва, где наблюдаются сложные частицы, входящие в состав материалов тел качения и сепараторов подшипников (Fe-Ni, Cr-Ni, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, Fe-Cr-Ni-Cu, Fe-Cr-Ni-V, Fe-Ni-V, Cr-Ni-V, Fe-V, Cr-V, Ni-V, Fe-Cr-Ni-Cu-Ag-V и Cu-Ag, Fe-Ag, Fe-Cu-Ag и т.д.).

4.3. Оценка технического состояния двигателя, находящегося в эксплуатации

4.3.1. Двигатель в норме

Техническое состояние узлов и агрегатов двигателя, омываемых маслом, считается в норме, когда ни один из параметров частиц изнашивания, из ниже представленных в разделе и участвующих в оценке технического состояния двигателя, по результатам СВЧ плазменных измерений пробы масла и смыва не превысил уровня $(\bar{x} + 2\sigma)$.

4.3.2. Двигатель в зоне особого контроля

4.3.2.1. В случае превышения двух и более параметров частиц изнашивания (в пробе масла и/или пробе смыва с МФС-30) граничных значений зоны особого контроля, т.е. $\bar{x} + 2\sigma < \bar{x} < \bar{x} + 3\sigma$ или одного параметра превысившего уровень $\bar{x} + 3\sigma$ (не считая количества частиц ванадия, см. п.7.1), необходимо направить эксплуатанту запрос по отбору полного набора проб.*

Эксплуатанту рекомендовать - не позднее, чем через 25 ч эксплуатации двигателя после обнаружения превышения, отобрать пробы масла с ПКП, ЗКП, произвести смыв с МФС-30 и полный набор проб направить на контрольный анализ СВЧ плазменным методом.

* Частицы состава Mg-Fe не учитываются при принятии диагностического решения, поскольку их количество с техническим состоянием двигателя не коррелирует.

4.3.2.2. Если превышение параметров относительно уровня $\bar{x} + 2\sigma$ по результатам контрольного анализа проб масел с ПКП, ЗКП и смыва с МФС-30 не подтверждается и двигатель не имеет на данный момент замечаний от эксплуатанта, постановка его на особый контроль не рекомендуется.

4.3.2.3. При подтверждении превышения параметров уровня $\bar{x} + 2\sigma$, эксплуатанту рекомендовать постановку двигателя на особый контроль. При этом рекомендовать проведение следующих мероприятий:

— снять и осмотреть на наличие стружки МФС-30, ЦВС-30, МСС, дополнительный фильтр в системе подачи масла к межвальному подшипнику и маслофильтры откачки в маслоснасосе откачки МНО-30К. При обнаружении крупных частиц (стружки) на фильтроэлементах необходимо описать их форму (игольчатые, пластинки, куски неправильной формы и т.д.), цвет (серая, серебристая, желтая, с цветами побежалости и т.д.), а также их количество (единичная, обильная и т.д.);

— проверить плавность вращения роторов 1-го и 2-го каскадов двигателя (плавное вращение с нормальным выбегом, с заеданием, с шумом и т.д.);

— провести вибродиагностику прибором ИВУ-1М межвального подшипника по бюллетеню №1935-БД;

— занести в карту «техническое состояние двигателя» данные вибродиагностики и осмотра фильтров:

— в некоторых случаях - заменить масло и провести опробование двигателя по сокращенной программе, после которого отобрать полный набор проб масел с ПКП, ЗКП и смыва с МФС-30 и направить на СВЧ плазменный метод анализ.

4.3.2.4. По результатам первичного и повторного анализов проводится «локализация» повреждения (см. раздел 9) и в зависимости от обнаруженного поврежденного узла, выдается рекомендации о дальнейшей эксплуатации двигателя.

Решение о возможности дальнейшей эксплуатации двигателя эксплуатантом принимается только по получению протокола результатов СВЧ плазменного метода анализа с рекомендациями.

4.3.2.5. Если пробы направлены на анализ по срабатыванию табло «Стружка в масле», то при величине параметров частиц изнашивания на уровне особого контроля эксплуатанту рекомендуется произвести замену масла, провести гонку по полной программе и направить на анализ полный набор проб.

Окончательное заключение о техническом состоянии двигателя и рекомендации по дальнейшей его эксплуатации выдаются после анализа проб масла и смыва, отобранных после гонки.

4.3.3. Двигатель в зоне повышенного износа (зона предельных значений)

4.3.3.1. В случае превышения более двух параметров (в пробе масла и/или пробе смыва с МФС-30) уровня $\bar{x} + 3\sigma$ эксплуатация двигателя приостанавливается, а эксплуатанту дается рекомендация по проведению мероприятий по п. 8.2.3.

При этом следует различать составы сложных частиц, превысивших граничные значения: если это частицы типа Fe-Cu, Mg-Fe-Cu, Mg-Cu – повышенный износ сепаратора(ов) подшипника в коробке приводов, если типа Fe-Cu-Ag, Cu-Ag, т.е. частицы содержат серебро – износ сепаратора подшипника(ов) трансмиссии. Если же имеются одновременно превышения параметров частиц, содержащих группу железа, типа Cr-Fe-, Ni-Fe, Cr-Ni-Fe, и сложные частицы типа Cr-Fe-V, Cr-Ni-Fe-V, Cr-Ni-Fe-Cu-Ag – имеет место повреждение тел качения и обойм подшипников, что значительно опаснее для эксплуатации. Это необходимо учитывать при выдаче рекомендаций по дополнительной гонке двигателя или его дальнейшей эксплуатации под особым контролем.

4.3.3.2. Если превышение параметров уровня $\bar{x} + 3\sigma$ по результатам анализа полного набора проб не подтверждается и двигатель по пункту 8.2.3. не имеет замечаний, производится его постановка на особый контроль.

4.3.3.3. При подтверждении превышения параметров уровня $\bar{x} + 3\sigma$ проводится локализация повреждения по результатам контрольного анализа проб (см. раздел 9).

4.3.3.4. При обнаружении повреждения в трансмиссии дальнейшая эксплуатация двигателя не рекомендуется.

4.3.3.5. При обнаружении повреждения в одной из КП, эксплуатанту рекомендуется замена узла или коробки приводов в целом. В случаях, установления износа шлицевых соединений, при небольшой скорости развития повреждения, рекомендуется продолжить эксплуатацию до предотказного состояния, отбирая пробы после каждого рейса.

4.3.3.6. После замены узла или агрегата эксплуатантом проводится замена масла и опробование двигателя по полной программе.

4.3.3.7. После замены масла и гонки эксплуатанту необходимо отобрать пробы масла с ПКП, ЗКП, смыв с МФС-30 и направить их на анализ СВЧ плазменным методом.

4.3.3.8. По результатам анализа полного набора проб после замены узла или агрегата, замены масла и гонки двигателя, эксплуатантом принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации двигателя под особым контролем.

4.4. Рекомендуемый порядок локализации повреждения

4.4.1. Признаки повышенного изнашивания зубчатых колес коробки приводов

Значения параметров частиц изнашивания в пробах масел с ПКП и ЗКП по всем элементам, за исключением железа, на уровне средних значений эталонного двигателя (т.е. значительно ниже границы $\bar{x} + 2\sigma$). Также отсутствуют превышения относительно эталонного двигателя по количеству составов и количеству сложных частиц.

Повышенное значение в пробах масел с ПКП и ЗКП имеет только содержание железа. При этом около 90% Fe находится в субмикронной форме, причем значения измеренного содержания в ПКП и ЗКП совпадают в пределах погрешности измерений.

В смыве с МФС-30 повышенные рейтинги имеет железо по параметрам $R_{\text{общ Fe}}$, $R_{\text{пр Fe}}$ и, возможно Ni-Fe. Остальные параметры частиц изнашивания ниже $\bar{x} + 2\sigma$.

Повреждение развивается сравнительно медленно в течение 100-300 ч, двигатель достигает предотказного состояния при $C_{\text{Fe}} = 5-6$ г/т.

4.4.2. Признаки повышенного изнашивания подшипников коробки приводов

Повреждение характеризуется повышенным содержанием железа и меди в пробах масла с ПКП и ЗКП. При этом содержание металла в субмикронной форме в 2-3 раза меньше, чем в виде частиц изнашивания.

Среди сложных частиц, как правило, максимальное значение имеют Fe-Cu, Mg-Cu, Mg-Fe-Cu, Fe-Cu-Me*, которые характеризуют повышенный износ сепараторов подшипников. В пробах масла обязательно присутствуют частицы типа Fe-Ni, Cr-Fe, Cr-Ni-Fe, показывающие на повышенный износ беговых дорожек и тел качения подшипников.

Параметры частиц серебра и ванадия на уровне средних значений эталонного двигателя.

В смыве с маслофильтра, как правило, параметры частиц изнашивания не достигают даже границы $\bar{x} + 2\sigma$, наблюдается превышение только рейтингов сложных частиц типа Fe-Cu, Me-Fe-Cu.

Повреждение развивается в течение 100-150 ч, предотказное состояние по результатам анализа проб масел наблюдается при $C_{Fe} = 2,5-3$ г/т, $C_{Cu} = 2-2,5$ г/т, при этом число частиц Fe-Cu составляет более 20 см^{-3} .

* Me – любой из определяемых элементов.

4.4.3. Признаки повышенного изнашивания маслоагрегатов

Повреждение характеризуется повышенным содержанием алюминия и магния в пробах масла с ПКП и ЗКП. При этом содержание металла в субмикронной форме в 2-3 раза меньше, чем в виде частиц изнашивания.

Среди числа сложных частиц, как правило, максимальное значение имеют частицы Al-Mg, Mg-Cu, Mg-Fe-Cu, Mg-Me.

Параметры частиц железа, меди, серебра и ванадия на уровне средних значений эталонного двигателя.

В смыве с маслофильтра, как правило, параметры частиц изнашивания не достигают даже границы $\bar{x} + 2\sigma$, наблюдается превышение только рейтингов сложных частиц типа Mg-Cu, Mg-Fe-Cu, Al-Mg.

4.4.4. Признаки повышенного изнашивания подшипников трансмиссии

4.4.4.1. Признаки повышенного изнашивания роликоподшипников (р/п) первой турбины и межвального.

Признаком повышенного изнашивания р/п 1-ой турбины и межвального роликоподшипника является обнаружение в пробе смыва с МФС-30 ванадия в виде «простых» и (либо) «сложных» частиц в числе от $3-5 \text{ см}^{-3}$ и более, которые связаны с износом тел качения и обойм подшипников, а также наличие в пробе частиц, характеризующих износ сепараторов, типа Cu-Ag, Me-Cu-Ag, имеющих высокие рейтинги (уровень особого контроля и выше).

Начальный этап развития повреждения обнаруживается только по пробам смыва с МФС-30. При этом, число частиц ванадия $N_V \geq 3-5 \text{ см}^{-3}$, при общем суммарном количестве частиц по всем элементам $\sim 5000 \text{ см}^{-3}$ параметр изнашивания достигает значений $V_{\text{изн}} \geq 0,8-1,0$, число составов сложных частиц $G \geq 70$. Рейтинги сложных частиц типа Cu-Ag, Me-Cu-Ag составляет более 20.

Параметры частиц изнашивания в пробе масла на начальном этапе развития повреждения указывают на нормальный износ двигателя. При дальнейшем развитии повреждения и разрушении любого из подшипников параметры частиц изнашивания в масле указывают на неисправность. Содержание железа может достигать значений $C_{\text{Fe}} \geq 8-10 \text{ г/т}$, число сложных частиц типа Cu-Ag более 20 штук.

4.4.4.2. Раздельная оценка технического состояния роликоподшипника 1-ой турбины и межвального.

Роликоподшипники первой турбины и межвальный (МВП) изготовлены из идентичных сплавов, (тела качения и обоймы - ЭИ-347-Ш, сепараторы бронзовые с нанесенным покрытием и подслоем серебра) и поэтому провести раздельную их диагностику только по результатам СВЧ плазменных измерений не представляется возможным. Раздельная оценка технического состояния указанных подшипников возможна совместно с помощью ИВУ-1М и СВЧ плазменного анализатора масла.

4.4.4.3. Признаки повышенного изнашивания подшипников КВД.

Роликоподшипник и ш/подшипник КВД изготовлены из идентичных материалов (сталь ШХ15-Ш - обоймы подшипников, имеющих состав Fe-Cr-Ni-Mn; БрАЖМц10-3-1.5 – бронзовый сепаратор с оловянно-свинцово-серебряным покрытием).

Признаками повышенного изнашивания одного, либо обоих подшипников является обнаружение в пробе масла и (либо) смыве с МФС-30 частиц типа Fe-Cr, Fe-Ni, Fe-Cr-Ni, превышающих граничные значения $\bar{x} + 2\sigma$, а также обязательным условием является высокие рейтинги составов частиц типа Cu-Ag, Me-Cu-Ag. Частицы ванадия при повреждении подшипников КВД не регистрируются при изготовлении подшипников КВД из стали ШХ-15.

4.4.5. Признаки повышенного изнашивания лабиринтного уплотнения

В пробах масла с ПКП и ЗКП содержания железа и меди имеют повышенные значения, но, не выше уровня $\bar{x} + 3\sigma$. Повреждение обнаруживается по большому количеству частиц Ni, значительно превышающему суммарное количество частиц по всем остальным элементам. Массовая доля никеля и хрома в коробках приводов выходит за границу $\bar{x} + 3\sigma$.

Среди сложных частиц в пробе масла наблюдаются большое количество составов и числа частиц типа Cr-Ni, Ni-Fe, Ni-Cu, Cr-Ni-Cu и др.

В смыве с МФС-30 повышенные рейтинги имеют только $R_{\text{общ Ni}}$ и $R_{\text{пр Ni}}$.

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 доходить 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 маслофильтре 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 газоздушного тракта, топливной аппаратуры ГТД, гидрокомплекса самолетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ влияния надежности на безопасность полетов по типу ВС / М. : Гос. Центр безопасности полетов, 2009. – 48с.
2. 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.
3. Двигатель ПС-90А. Анализ эффективности методов диагностирования подшипников в эксплуатации : техническая справка №45412 ; АО «ОДК-Авиадвигатель». – Пермь, 2007. – 17с.
4. Калашников, С. И. Применение анализатора БАРС-3 для технической диагностики авиационной техники / С. И. Калашников. – М. : 1985 – 80с.
5. Богоявленский, А. А. Формирование системы обеспечения единства измерений концентрации продуктов изнашивания при диагностировании авиационных ГТД : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. А. Богоявленский, МГТУ ГА. – М. , 1994. – 17 с.
6. Грядунов, К. И. Метод обеспечения достоверности диагностирования авиационных двигателей по содержанию металлов в маслах : специальность 05.22.14. «Эксплуатация воздушного транспорта» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. И. Грядунов ; МГТУ ГА. – Москва, 2016. – 20с.
7. Делли, Р. Д. Обзор феррографии и её применение при техническом обслуживании / Р. Д. Делли // Первая междунар. конф. 99 «Энергодиагностика»: сб. трудов / Российское АО "Газпром"[и др.] – Москва, 1995. – Т. 3. – С. 120–152.
8. Патент № 2216717С2 Российская Федерация, МПК G01М 15/04 (2006.01), G01М 15/00 (2006.01). Способ диагностики состояния двигателей : № 2001105631/06: заявл. 27.02.2001 : опубл. 20.11.2003 / Алхимов А. Б., Дроков В. Г., Морозов В. Н., Скудаев Ю. Д. 11с.

9. Дасковский, М. И. Обобщение опыта трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей и разработка мер по повышению ее эффективности: специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта»: дис. . . . канд. техн. наук / М. И. Дасковский; ФГУП ГосНИИ ГА. – М., 2012. – 178 с.

10. Harrop N. Early detection of transmission failures through oil system debris assessment / N. Harrop, D. Montagu // MCD Booklet, Rolls-Royce, VCOM 4838, 2001. – URL: <https://www.scribd.com/document/219160522/MCD-Booklet> (дата обращения: 14.07.2023).

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. Day, L. The secret's in the filter / L. Day // Tribology & Lubrication Technology.– 2008.– Vol. 64, no. 2.– P. 32–37.

16. Патент № 2239172 С2, Российская Федерация. МПК G01N 15/00 (2006.1) Способ диагностики состояния двигателей : № 2001130399/06 : заявл. 13.11.2011 : опубл. 27.10.2004 / М. С. Гайдай, В. Г. Дроков, А. Казмиров [и др.]; 7 с.

17. Патент № 2491536 С1, Российская Федерация, МПК G01N 23/223 (2006.01) Способ поузловой трибодиагностики авиационной техники по параметрам частиц изнашивания : № 2012101154/28 : заявл. 11.01.2012 : опубл. 27.08.2013 / В.Г. Дроков, Ю.Д. Скудаев, В.Ф. Халиулин; 8 с.

18. Патент № 2275618 С2, Российская Федерация, МПК G01N 21/00 (2006.01), G01N 21/73 (2006.01), G01N 21/62 (2006.01), G01N, 21/71 (2006.01) Способ определения параметров простых и сложных частиц износа в маслосистеме двигателя : № 2004113296/28 : заявл. 30.04.2004 : опубл. 27.04.2006 / Гайдай М. С., Дроков В. Г., Кузменко М. Л., Матвеев Г. П., Овчинин Н. Н., Скудаев Ю. Д., Червонюк В. В.; 12 с.

19. Дементьев, В.Я., Дроков, В.Г., Зарубин, В.П., Казмиров, А.Д., Подрезов, А.М., Скудаев, Ю.Д. Плазменный сцинтилляционный спектрометр для определения микропримесей металлов в смазочных маслах и спецжидкостях. «Энергодиагностика»: сборник трудов. Том 3. Трибология междунар. конф. (Москва, 1995 г.). – М. : Трибология. – 1995. – Т. 3. – С. 322-330.

20. Техническая справка по двигателям Д-30КУ/КП/КУ-154, имевшим неисправности узлов и агрегатов, омываемых маслом при контроле сцинтилляционным методом за период 2000 - 2007 гг: техническая справка №44-517141 ; ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2008. – 18 с.

21. Анализ причин отказов при выявлении в эксплуатации диагностического признака «стружка в масле» за период 2000–2013 гг. : техническая справка № 44-538241 ; ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2014. – 157 с.

22. Техническая справка по двигателям Д-30КУ/КП/КУ-154, имевшим неисправности узлов и агрегатов, омываемых маслом при контроле сцинтилляционным методом: техническая справка №44-515887; ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2004. – 28 с.

23. Анализ съёмов двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 за период 2000-2004 гг. по неисправностям узлов, омываемых смазочным маслом: техническая справка № 44-596168 ; ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2005. – 32 с.

24. Анализ досрочного съёма двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 в 2000г. на основании показаний средств штатной диагностики, при исследовании которых заявленный эксплуатирующей организацией дефект не подтвердился: техническая справка № 44-515359 ; ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2005. – 8 с.

25. Иноземцев, А. А. Состояние, перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. Часть 1. Влияние технологий спектральных измерений массовой доли элементов в частицах изнашивания на результаты диагностирования узлов трения авиационных газотурбинных двигателей / А. А. Иноземцев, В. Г. Дроков, В. В. Дроков // Контроль. Диагностика. – 2011. – №2(152). – С. 32-39.

26. Дроков, В. Г. Оценка технического состояния маслосистемы авиационных газотурбинных двигателей с помощью трибодиагностических методов / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, Ф. И. Мухутдинов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84. № 1. – С. 36-46.

27. Оценка технического состояния двигателя по содержанию металлических примесей в масле: бюллетень № 384-БД-Г. – М., 1986. – 11 с.

28. Методика диагностирования узлов трения, омываемых смазочным маслом, двигателей Д-30КУ и Д-30КП методом рентгеноспектрального анализа: методика диагностирования / Москва. – М, 1990. – 4 с.

29. Контроль двигателей посредством анализа масла на содержание металлов: бюллетень №756-БЭ-Г. – М., 1996. 13с.

30. Ямпольский, В. И. Контроль и диагностирование гражданской авиационной техники / В. И. Ямпольский, Н. И. Белоконь, Б. Н. Пилипосян. – М.: Транспорт, 1990. – 181с. – ISBN 5-277-00996-5.

31. Новиков, А. С. Контроль и диагностика технического состояния газотурбинных двигателей: учеб. пособие для вузов по направлению подгот. дипломир. специалиста 160300 "Двигатели летат. аппаратов" и специальности 160301 "Авиац. двигатели и энергет. установки" / А. С. Новиков, А. Г. Пайкин, Н. Н. Сиротин. – Москва: Наука, 2007. – 468 с. – ISBN: 5-02-035300-0.

32. Степанов, В. А. Диагностика технического состояния узлов трансмиссии газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле: моногр. / В. А. Степанов. – Рыбинск: Изд-во ЦИАМ, 2002. – 232 с. – ISBN 5-94049-006-9.

33. 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)»: дисс. д-ра техн. наук / В. Г. Дроков; ГосНИИ ГА. – М., 2009. – 285 с.

34. Williams, J. A. Wear and wear particles - some fundamentals / J. A. Williams – DOI: doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.007 // Tribology International. – 2005. – Vol. 38 (10). – pp. 863-870.

35. Двигатель ПС-90А. Руководство по технической эксплуатации : методическое пособие / Аэрофлот. – Москва : Аэрофлот, 2004. – 15с.

36. Диагностирование авиационных ГТД по накоплению продуктов изнашивания в смазочных маслах / С. Н. Бабаев, В. Г. Дроков., В. Н. Морозов, А. С. Нечаев, Г. В. Павлинский // «Энергодиагностика и Condition Monitoring» : сборник статей 3 междунар. конф. (Н. Новгород, 4-9 сентября 2000 г.). – М.: Трибология. – 2001. – Т. 3. – С. 38-58.

37. Alchimov, A. B. The comparative metrological estimation of methods of emission spectral analysis for wear product in aviation oils / A. B. Alchimov, S. I. Drobot, V. G. Drovov, V. P. Zarubin., A. P. Kazmirov, Y. D. Skudaev // 10th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM'97, Helsinki, Finland, 9–11 Jun 1997) : VTT Technical Research Centre of Finland, 1997, vol. 2, pp. 312–321.

38. Anderson, D. P., “Wear Particle Atlas (Revised)” prepared for the Naval Air Engineering Center, Lakehurst, NJ 08733, 28 June 1982, Report NAEC-92-163, Approved for Public Release; Distribution Unlimited – Pp. 125-134.

39. Wei Hong, Wenjian Cai, Shaoping Wang, Mileta M. Tomovic. Mechanical wear debris, detection, and diagnosis: a review / Wei Hong, Wenjian Cai, Shaoping Wang, Mileta M. Tomovic // Chinese Journal of Aeronautics – 2018. – vol. 31. – iss. 5. – pp 867–882.

40. Двигатель ПС-90А. Анализ статистики и диагностических признаков дефектов роликового подшипника ТВД : техническая справка № 34676 ; ОАО «Авиадвигатель». – Пермь, 1999. – 32с.
41. Двигатель ПС-90А. Анализ эффективности методов диагностирования подшипников в эксплуатации : техническая справка №45412 ; ОАО «Авиадвигатель». – Пермь, 2007. – 17 с.
42. Диагностика стадии поверхностного усталостного изнашивания деталей авиационных редукторов методами феррографии / Л. А. Шабалинская, В. В. Голованов, Е. С. Бубнова, А. О. Мельников // Трибология-Машиностроению : труды XI Международной научно-технической конференции (Москва, 1-3 ноября 2016 г.) / ИМАШ РАН. – М. : Изд-во Инновационное машиностроение. – 2016. – С. 271-273.
43. Программа по спектрометрическому анализу масла и фильтров двигателя TRE-331 Allied Signal : информационный бюллетень № P331-97. – 1995. – 9 с.
44. Toms, A. Using Filter Debris Analysis to Identify Component Wear in Industrial Applications / Allison M. Toms, Michael P. Barrett // Insight Services white paper. – URL: <https://forms.testoil.com/acton/attachment/4748/f-013d/1/-/-/-/-/FDA%20White%20paper.pdf> (дата обращения: 01.06.2023).
45. Humphrey, G.R. Filter debris analysis by energy dispersive x-ray fluorescence applied to J52P408 engines // ICDD, Advances in X-ray Analysis, 2007. Vol. 51.
46. Madhavan, P. J. Lubricant condition monitoring using filter debris analysis / P. Madhavan, M. Steves, G. Rosenberg, J. Schindler // Practicing Oil Analysis. – Vol. 7. – Pp. 46-51.
47. Дроков, В. Г. Диагностика узлов авиационных газотурбинных двигателей, омываемых смазочным маслом, по результатам анализа пробы смыва с диагностического слоя фильтроэлемента / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко, Ф. И. Мухутдинов, Ю. Д. Скудаев, В. Ф. Халиуллин. – DOI:

<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-8-39-43> // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84. – № 8. – С. 39–43.

48. Разработка технологии диагностирования авиадвигателей, оснащённых фильтроэлементом с диагностическим слоем / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко, Ф. И. Мухутдинов, В. Ф. Халиуллин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5 (47). Часть 3. С. 212–218. URL: <https://journals.ssau.ru/vestnik/issue/viewIssue/119/77>

49. Об оснащении двигателей авиакомпания «Дальавиа» фильтрами фирмы PALL с диагностическим слоем : эксплуатационно-техническое указание № 94-202007 ; АО «ОДК-Авиадвигатель». – Пермь, 2007. – 7с.

50. Двигатель ПС-90А. Эксплуатационная проверка многоэлементного спектрального анализа проб масла при диагностике двигателей : бюллетень № 94370-БЭ-Г. – М., 2005. – 9 с.

51. Аттестат методики измерения концентрации продуктов изнашивания на установках типа МФС при диагностике авиационных двигателей. – М.: Изд-во ГосНИИГА, 1993. – 20с.

52. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Лозицкий, Л.П., Степаненко, В.П. [и др.] ; под ред. Степаненко В. П.. – Москва. : Транспорт, 1985 – 102 с.

53. Свидетельство об утверждении типа стандартного образца RU.C.01.442.A №4639/1. Регистрационный № ГСО10696-2015.

54. Разработка и аттестация СОП продуктов изнашивания авиационного ГТД (СОП СОЧПИ ДТ1-01): Отчет по НИР / НИИ прикладной физики. – Иркутск. 2001. – 54 с.

55. Разработка и исследование метода диагностики оmyваемых узлов трения авиационного двигателя на установке МФС-3 : отчет о НИР / ВНИИЭРАТ. – М., 1983. – 65 с.

56. Иноземцев, А. А Состояние и перспективы спектральной трибодиагностики авиационных ГТД. Часть 4. Диагностические параметры и точки

отбора пробы масла при оценке технического состояния авиационных ГТД по результатам спектральных измерений / А. А. Иноземцев, В. Г. Дроков, В. В. Дроков, А. Д. Казмиров, А. Е. Калошин // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 9(156). – С. 20–28.

57. Халиуллин, В. Ф. Опыт работы ОАО «Авиадвигатель» по повышению эффективности систем трибодиагностики ГТД / В. Ф. Халиуллин // Заседание межведомственного Совета по трибодиагностике : материалы совета (Москва, 19 марта 2014г.) / ГНЦ ФАУ «ЦИАМ имени П. И. Баранова». – Москва : Изд-во ЦИАМ.

58. Применение средств тонкой очистки масла и «неэффективность» методов и средств трибодиагностики / Международный научно-технический симпозиум «Авиационные технологии XXI века»: Материалы симпозиума (Москва, 15-19 августа 2011 г.). – Москва, 2011.

59. Анализ эффективности применения системы MetalScan при испытаниях двигателя ПД-14 : технический / отчет АО «ОДК-Авиадвигатель». – Пермь, 2018. – 60с.

60. Spectrometric oil analysis. Detecting engine failures before they occur / Eisentraut, K. J., Newman, R. W., Saba, C. S., Kauffman, R. E., Rhine, W. E. // Analytical Chemistry. – 1984. – Vol. 56, №9. – Pp. 1086A-1094A.

61. 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.

62. Халиуллин, В. Ф. Маслосистема под непрерывным контролем / В. Ф. Халиуллин // Информационно-технический бюллетень «Пермские газовые турбины». – 2012. – № 22. – С. 46–48.

63. 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.

64. Степанов, В. А. Особенности диагностирования усталостного выкрашивания поверхностей трения подшипников качения и зубчатых передач газотурбинных двигателей / В. А. Степанов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006. – №9. – С. 15-19.

65. Акт-отчет по техническому состоянию подшипников качения после длительных испытаний двигателя Д-30КУ-154 №485459 до общей наработки 18 000 часов и для оценки сцинтилляционного метода диагностики двигателя : акт-отчет №207/037-502/98 ; ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 1998. – 19с.

66. Иноземцев, А. А. Состояние, перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. Часть 3. Сцинтилляционный атомно-эмиссионный способ измерения параметров металлических частиц в пробах авиационных масел / Иноземцев А.А., Дроков В.Г., Дроков В.В. // Контроль. Диагностика. – 2011. – №6(156). – С. 14-27.

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

68. Франкштейн, Л. И. Опыт разработки и внедрения перспективных схем и устройств в масляную систему авиационных двигателей / Л. И. Франкштейн // Конверсия в машиностроении. – 2003. – №3. – С. 72-91.

69. Development of microwave plasma method for measurement of wear particle parameters in lubricant oil samples from aircraft gas turbine engines / V. G. Drokov, V. V. Drokov, N. A. Ivanov, V. V. Myrishenko, Y. D. Skudaev, A. Y. Hodunaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012059.

70. Technical state evaluation of oil-lubricated parts and units of aircraft gas turbine engines using microwave plasma method / V. G. Drokov, V. V. Drokov, N. A. Ivanov, V. V. Myrishenko, Y. D. Skudaev, A. Y. Hodunaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012058.

71. Дасковский, М. И. Опыт применения различных методов трибодиагностики двигателя ПС-90А в процессе его эксплуатации / М. И. Дасковский // *Механика и машиностроение*. – 2011. – С. 1033-1035.
72. Спектральный анализ чистых веществ ; под ред. Х. И. Зильберштейн. – Л.: Химия. 1971. – 415 с.
73. Лосев, Н. Ф. Количественный рентгеноспектральный анализ / Н.Ф. Лосев. – М.: Наука, 1969. – 336 с.
74. Pavlinsky, G.V. Fundamentals of X-Ray Physics / Cambridge International Science Publishing Ltd.UK. 2008. – 244 p.
75. Соболев, И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболев // М.: Наука, 1973. – 305 с.
76. Смагунова, А. Н. Методы математической статистики в аналитической химии : учеб. пособие / А. Н. Смагунова, О. М. Карпукова ; ИГУ. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2008. – 339 с. – ISBN: 978-5-222-19507-9.
77. Боровиков, В. П. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере / В. П. Боровиков. – 2. изд. – М. [и др.] : Питер, 2003. – 688 с. – ISBN 5-272-00078-1.
78. Моделирование процессов фильтрации металлической дискретной примеси в маслосистеме ГТД методом Монте-Карло / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, А. Д. Казмиров, А. Ю. Ходунаев // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. – 2019. – № 27. – С. 96-108.
79. Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 Методика диагностирования двигателей при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным комплексом МД-1-00-2020 / Иркутск, 2020 / Разработчик: ООО «Диагностические технологии» / Владелец: ПАО «ОДК-Сатурн» / Согласовано ФГУП «ГосНИИГА»
80. Кеба, И. В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей / И. В. Кеба. – М.: Транспорт, 1980. – 246 с.
81. Отчет о результатах работы комиссии по тестированию программного обеспечения (ПО) «Призма-сплавы» и «Анализ стружки», версия 2, для определения марки материала стружки, обнаруженной на контрольных элементах

маслосистемы двигателя ПС-90А : отчет, утв. 13.09.2005 г. / Управление надзора за поддержанием летной годности гражданских воздушных судов. – Москва, 2005. – 63 с.

82. Патент №2118815 С1, Российская федерация, МПК G01N 21/73 (2006.01) Способ определения микропримесей металлов в смазочных маслах, топливах и специальных жидкостях и устройство для его осуществления : заявл. 07.02.1996 : опубл. 10.09.1998 / Алхимов А.Б., Дроков В.Г., Зарубин В.П., Казмиров А.Д. [и др.]. 8 с.

83. Патент № 2082284 С1, Российская Федерация, МПК H05B 7/18 (2006.01), H05H 1/46 (2006.01), H01J 37/32 (2006.01) СВЧ плазмотрон циклонного типа : заявл. 27.12.1994 : опубл. 20.06.1997 / Дроков В.Г., Казмиров А.Д., Алхимов А.Б. ; 4 с.

84. 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. DOI: 10.14489/td.2023.05.pp.042-049

85. Патент РФ 193338 U1, Российская федерация, МПК B05B 17/06 (2006.01) Ультразвуковой распылитель : №2019121387 : заявл. 09.07.2019 : опубл. 24.10.2019 / Дроков В.В., Дроков В.Г., Иванов Н.А., Казмиров А.Д., Мурыщенко В.В., Паньков Л.В., Скудаев Ю.Д.

86. 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 сверхвысокочастотного плазменного анализатора // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 45. С. 41–50.

87. Ходунаев, А. Ю. 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»: дисс. канд. техн. наук / А. Ю. Ходунаев; ФГБОУ ВО ОмГТУ. – Омск, 2023. – 107 с.

88. Мурыщенко, В. В. Совершенствование СВЧ плазменного анализатора и методик диагностирования узлов, омываемых смазочным маслом авиационных газотурбинных двигателей при проведении приёмосдаточных испытаний: специальность 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»: дисс. канд. техн. наук / В. В. Мурыщенко; ФГБОУ ВО ОмГТУ. – Омск, 2024. – 135 с.

89. Прокопчук, С. И. Совершенствование и применение сцинтилляционного эмиссионного спектрального определения золота в геологических пробах : 02.00.02 «аналитическая химия» : дисс. канд. техн. наук / С. И. Прокопчук ; Институт геохимии СО РАН. – Иркутск, 1986. – 124 с.

90. Бусько, А.Е. Дуговой сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ с многоканальным анализатором эмиссионных спектров для определения золота, серебра, платины и палладия в геохимических объектах: 02.00.02 «аналитическая химия» дисс. канд. техн. наук / Бусько А.Е. ; Институт геохимии СО РАН. – Иркутск, 2015. – 124с.

91. Исследование частиц изнашивания в пробах масел газотурбинных двигателей РФА «ФОКУС-2» / В. Г. Дроков, Г. В. Павлинский, А. В. Синицкая, А. Ю. Ходунаев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. Т. 83, №7. – С. 32-36.

92. Рентгеноспектральный электронно-зондовый микроанализ природных объектов / Л. А. Павлова, О. Ю. Белозерова, Л. Ф. Парадина, Л. Ф. Суворова ; отв. ред. А. Г. Ревенко ; Российская акад. наук Сибирское отд-ние, Институт геохимии им. А. П. Виноградова. – Новосибирск : Наука, 2000. – 219 с.

93. Крекнин, Ю.С., Сафонов, Л.А. Рентгеноспектральный анализ продуктов износа газотурбинных двигателей способом фундаментальных параметров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73, № 4. С. 12-15.

94. Дроков, В.Г. Результаты микрорентгеноспектральных измерений состава частиц изнашивания в системе смазки авиационных газотурбинных

двигателей / В.Г. Дроков, В.Вл. Дроков, В.В. Мурыщенко, Л.А. Павлова, Ю.Д. Скудаев / Научный вестник ГосНИИ ГА №33. Москва – 2020г. 19 – 29 стр.

95. Дасковский, М. И. Оценка влияния размеров ячеек фильтров на эффективность трибодиагностики / М. И. Дасковский // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010 – №162. – С. 176-180.

96. Дроков, В. Г., Дроков, В. В., Казмиров, А. Д., Мурыщенко, В. В., Элькес, А. А. Оценка состояния смазываемых узлов трения авиационных двигателей Д-30КП/КП-2 при приёмо-сдаточных испытаниях / Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 20–31

97. Дроков, В.Г. Результаты определения элементного состава металлических частиц изнашивания в пробах авиационных ГТД, измеренные СВЧ плазменным и электронно-зондовым микрорентгеноспектральным (ЭРСМА) методами анализа / В.Г. Дроков, В.В. Дроков, В.В. Мурыщенко, Л.А. Павлова, Ю.Д. Скудаев / Научный вестник ГосНИИ ГА 2020г. №33. С. 58 – 68

98. САМ-ДТ-01-2. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.31.373.A № 63023 от 15.07.2016 г. Наименование типа СИ Анализаторы сцинтилляционные САМ-ДТ-01-2 Регистрационный № 64625–16.

99. Методика поверки МП 07-251-2016. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1015 от 13.07.2016 г.

100. По вопросу: Применение сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей : бюллетень № 1772-БД-Г Издание: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. – М. : Министерство транспорта РФ, 2001 г.

101. По вопросу: Применение сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей : бюллетень № 1756-БД-Г Издание: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. – М. : Министерство транспорта РФ, 2000 г.

102. По вопросу: Применение сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей : бюллетень № 1786-БД-Г Издание:

Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. – М. : Министерство транспорта РФ, 2003 г.

103. По вопросу: Продление срока действия бюллетеня № 1786-БД-Г по применению сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей : бюллетень № 1827-БЭ-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154 ; ОАО «НПО Сатурн». – Рыбинск, 2006 г.

104. По вопросу: Продление срока действия бюллетеня № 1786-БД-Г по применению сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей : бюллетень № 1840-БЭ-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154 ; ОАО «НПО Сатурн». – Рыбинск, 2007 г.

105. По вопросу: Продление срока действия бюллетеня № 1786-БД-Г по применению сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей : бюллетень № 1854-БЭ-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154 ; УНПЛГ ГВС "Ространснадзора" 02.04.2008, ОАО «НПО Сатурн». – РФ, 2008 г.

106. Патент № 2285907 С1. Российская Федерация, МПК G01М 15/00 (2006.01), G01N 21/67 (2006.01) Способ технического состояния двигателей, машин и механизмов : № 2005113119/28 : заявл. 29.04.2005 : опубл. 20.10.2006 / Горбунов, А. И., Дроков, В. Г., Иноземцев, А. А., Казмиров, А. Д., Скудаев, Ю. Д., Чернов, В. И. 22 с.

Протокол №1 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла с ПКП двигателя Д-30КУ №391-213

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30ку №: 391213

Номер борта: 86530 Номер силовой установки: 1

Организация: Домодедовские авиалинии

Наработка ППР (часы): 269 (полетные циклы): 0

Наработка СНЭ (часы): 0 (полетные циклы): 0

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: ПКП

Дата отбора пробы: 24.03.2018

Дата анализа: 05.04.2005

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	Nпр, см3	Ср, г/т	Сч, г/т	С, г/т	D, мкм
Al	1	1	0	0	0	7,2
Cr	0,5	0,5	0	0	0	1,9
Ni	3,5	2	0	0	0	3,74
Mg	10,5	10,5	0,08	0	0,08	4,92
Fe	268	257	1,41	0,2	1,62	5,5
Cu	1705	1684	0,74	0,5	1,24	3,96
Ag	308	295,5	0,13	0,26	0,39	5,34
V	0		0	0	0	0

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 5

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,02

Состав	Количество
-Cu-Ag	11,5
-Fe-Cu	8,5
-Fe-Ag	1
-Ni-Fe	1

Протокол №2 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла с ЗКП двигателя Д-30КУ №391-213

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30ку №: 391213

Номер борта: 86530 Номер силовой установки: 1

Организация: Домодедовские авиалинии

Наработка ППР (часы): 269 (полетные циклы): 0

Наработка СНЭ (часы): 0 (полетные циклы): 0

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: ЗКП

Дата отбора пробы: 24.03.2018

Дата анализа: 05.04.2005

Количество параллельных измерений: 3

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	Nпр, см3	Ср, г/т	Сч, г/т	С, г/т	D, мкм
Al	6,67	4	0	0,07	0,07	18,99
Cr	5	1,33	0	0,01	0,01	6,62
Ni	5	1,33	0	0	0	4,69
Mg	23,67	14	0,04	0,05	0,09	11,9
Fe	865,67	806	1,7	2,89	4,59	9,19
Cu	4256	4157,67	0,88	1,54	2,42	4,26
Ag	492,33	443	0,11	0,55	0,66	5,87
V	0		0	0	0	0

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 22

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,04

Состав	Количество
-Fe-Cu	43,67
-Cu-Ag	42
-Fe-Ag	4
-Mg-Cu	3,33
-Fe-Cu-Ag	2
-Mg-Fe-Cu	2
-Mg-Fe	1,33
-Ni-Fe	1,33
-Al-Cu	1
-Cr-Mg	1
-Ni-Fe-Cu	1

Протокол №3 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе смыва с МФС-30 двигателя Д-30КУ №391-213

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30ку №: 391213

Номер борта: 86530 Номер силовой установки: 1

Организация: Домодедовские авиалинии

Наработка ППР (часы): 410 (полетные циклы): 0

Наработка СНЭ (часы): 0 (полетные циклы): 0

Продукт отбора пробы: смыв

Точка отбора пробы: МФС

Дата отбора пробы: 14.04.2018

Дата анализа: 18.04.2005

Количество параллельных измерений: 3

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	79	18,88	60,33	14,42	70,27	0,31
Cr	23,33	5,58	4,67	1,12	28,3	4
Ni	65	15,53	42,33	10,11	8,28	0,54
Mg	263,67	63	222,33	53,12	10,54	0,19
Fe	836,67	199,9	756	180,63	16,16	0,11
Cu	2535,33	605,77	2450,33	585,46	4,95	0,03
Ag	380,33	90,87	347	82,91	5,74	0,1
V	2	0,48	0,33	0,08	0	5

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 52

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,08

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Fe-Cu	31,67	7,57
-Cu-Ag	18,33	4,38
-Mg-Fe	12	2,87
-Mg-Cu	8,33	1,99
-Ni-Fe	7,67	1,83
-Fe-Ag	4,67	1,12
-Mg-Fe-Cu	4,33	1,04

Протокол №4 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла с ПКП двигателя Д-30КП-2 №384-097

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 384097

Номер борта: 76360 Номер силовой установки: 1

Организация: Алроса

Наработка ППР (часы): 1233 (полетные циклы): 349

Наработка СНЭ (часы): 7522 (полетные циклы): 1938

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: ПКП

Дата отбора пробы: 11.04.2017

Дата анализа: 13.04.2017 20:00:00

Количество параллельных измерений: 3

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	Nпр, см3	Ср, г/т	Сч, г/т	С, г/т	D, мкм
Al	11,67	10	0,29	0,02	0,3	7,3
Cr	93,67	3	0,41	0,08	0,49	5,27
Ni	6,33	3,33	0,03	0	0,03	3,28
Mg	102,33	91,67	0,23	0,04	0,26	6,42
Fe	1411,67	1302	3,57	0,97	4,54	5,42
Cu	179	152	0,13	0,03	0,16	3,03
Ag	26	19,67	0,04	0,02	0,07	4,96
V	10,33	4	0,18	0	0,18	0

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 21

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,16

Состав	Количество
-Cr-Fe	75,67
-Fe-Cu	10
-Cr-Fe-Cu	5,33
-Mg-Cu	4,33
-Fe-Ag	3,67
-Cr-Fe-V	3,33
-Mg-Fe	2,67
-Cu-Ag	2
-Cr-Mg-Fe-Cu	1,33

Протокол №5 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла с ЗКП двигателя Д-30КП-2 №384-097

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 384097

Номер борта: 76360 Номер силовой установки: 1

Организация: Алроса

Наработка ППР (часы): 1233 (полетные циклы): 349

Наработка СНЭ (часы): 7522 (полетные циклы): 1938

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: ЗКП

Дата отбора пробы: 11.04.2017

Дата анализа: 13.04.2017 14:45:00

Количество параллельных измерений: 3

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	Nпр, см3	Ср, г/т	Сч, г/т	С, г/т	D, мкм
Al	15	14	0,13	0	0,13	3,95
Cr	55,33	9,33	0,04	0,02	0,06	4,21
Ni	4,67	1,67	0	0	0	4,45
Mg	45	38,33	0,11	0,06	0,17	9,71
Fe	644	586,33	2,45	0,76	3,21	6,6
Cu	116	101,67	0,07	0,05	0,12	4,52
Ag	16,33	11	0,02	0,01	0,03	3,6
V	6,33	0,33	0,04	0	0,04	0

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 21

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,18

Состав	Количество
-Cr-Fe	38
-Fe-Cu	3,67
-Cr-Fe-V	2,67
-Cu-Ag	2,33
-Mg-Fe	1,67
-Mg-Cu	1,33
-Cr-Fe-Cu	1
-Cr-V	1
-Ni-Cu	1

**Протокол №6 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания
в пробе смыва с МФС двигателя Д-30КП2 №384-097**

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 384097

Номер борта: 76360 Номер силовой установки: 1

Организация: Алроса

Наработка ППР (часы): 1233 (полетные циклы): 349

Наработка СНЭ (часы): 7522 (полетные циклы): 1938

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: МФС

Дата отбора пробы: 11.04.2017

Дата анализа: 13.04.2017 21:32:00

Количество параллельных измерений: 3

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	372,67	44,22	297	35,24	12,97	0,25
Cr	95,67	11,35	40,33	4,79	6,7	1,37
Ni	248	29,43	147	17,44	3,6	0,69
Mg	1310,67	155,52	887,67	105,33	3,36	0,48
Fe	2115	250,96	1530	181,54	3,62	0,38
Cu	3889,33	461,5	3104,67	368,39	2,01	0,25
Ag	380,33	45,13	278	32,99	3,08	0,37
V	16	1,9	1,67	0,2	0	8,6

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 67

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,34

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Fe-Cu	297,67	35,32
-Mg-Cu	164	19,46
-Mg-Fe-Cu	121,67	14,44
-Mg-Fe	53,67	6,37
-Cu-Ag	50,33	5,97
-Ni-Cu	50	5,93
-Al-Cu	19,67	2,33
-Ni-Fe	14	1,66
-Mg-Fe-Cu-Ag	11	1,31
-Al-Mg	10,67	1,27
-Al-Fe	10	1,19
-Mg-Cu-Ag	9,33	1,11

ПРИЛОЖЕНИЕ В

**Протокол №7 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в
пробе масла с КП двигателя ПС-90А №31-040**

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: пс90а №: 31040

Номер борта: 64026 Номер силовой установки: 2

Организация: Владивосток Авиа

Наработка ППР (часы): 1640 (полетные циклы): 299

Наработка СНЭ (часы): 4664 (полетные циклы): 1375

Продукт отбора пробы: мт319а

Точка отбора пробы: КП

Дата отбора пробы: 27.01.2018

Дата анализа: 31.01.2006

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	Nпр, см3	Ср, г/т	Сч, г/т	С, г/т	D, мкм
Al	0		0	0	0	0
Cr	0		0	0	0	0
Ni	0,5	0,5	0	0	0	0,23
Mg	8,5	8	0	0,01	0,01	8,81
Fe	6,5	6	0	0,02	0,02	9,7
Cu	2,5	2,5	0	0	0	2,47
Ag	0,5	0,5	0,05	0	0,05	2
V	0		0	0	0	0

**Протокол №8 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в
пробе смыва с Ф/Э QA-07930 двигателя ПС-90А №31-040.**

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: пс90а №: 31040

Номер борта: 64026 Номер силовой установки: 2

Организация: Владивосток Авиа

Наработка ППР (часы): 1640 (полетные циклы): 299

Наработка СНЭ (часы): 4664 (полетные циклы): 1375

Продукт отбора пробы: смыв

Точка отбора пробы: МФРАЛ

Дата отбора пробы: 27.01.2018

Дата анализа: 02.02.2006

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	21,5	8,9	16	6,62	32,84	0,34
Cr	20,5	8,48	2	0,83	23,38	9,25
Ni	9,5	3,93	3	1,24	6,47	2,17
Mg	1674,5	692,94	1629	674,12	14,98	0,03
Fe	527,5	218,29	467,5	193,46	11,3	0,13
Cu	135,5	56,07	130,5	54	3,45	0,04
Ag	26,5	10,97	23	9,52	5,51	0,15
V	1	0,41	0,5	0,21	0	1

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 17

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,06

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Mg-Fe	37	15,31
-Cr-Fe	11	4,55
-Al-Mg	3,5	1,45
-Cr-Ni-Fe	3,5	1,45

**Протокол №9 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в
пробе смыва с диагностической ленты Ф/Э QA-07930-01 двигателя ПС-90А №72-
196**

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: пс90а №: 72196

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0

Организация: стандарт

Наработка двигатель (часы): 1 (минуты): 0

Наработка масло (часы): 0 (минуты): 0

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: ФЭ

Дата отбора пробы: 21.10.2019

Дата анализа: 07.11.2019 17:04:00

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	217,5	130,32	97,5	58,42	19,52	1,23
Cr	56	33,55	14,5	8,69	6,78	2,86
Ni	11	6,59	2	1,2	10,64	4,5
Mg	399	239,07	257	153,98	7,52	0,55
Fe	165,5	99,16	104,5	62,61	9,04	0,58
Cu	762	456,56	721,5	432,29	7,78	0,06
Ag	58	34,75	46	27,56	6,73	0,26
V	0	0			0	

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 28

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,34

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Al-Mg	105,5	63,21
-Cr-Fe	20,5	12,28
-Fe-Cu	11,5	6,89
-Cr-Mg	11	6,59
-Mg-Cu	8	4,79
-Mg-Fe	8	4,79
-Cr-Ni-Fe	4,5	2,7

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Протокол №10 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе смыва с МФС двигателя Д-30КП2 №189-021, наработка 6 часов 31 минута

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 189021

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0

Организация: ПАО"НПО"Сатурн"

Наработка двигатель (часы): 6 (минуты): 31

Наработка масло (часы): 0 (минуты): 14

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: МФС

Дата отбора пробы: 17.10.2018

Дата анализа: 18.10.2018 15:21:00

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	2933,5	262,22	2539,5	227	14,74	0,16
Cr	405,5	36,25	259,5	23,2	8,51	0,56
Ni	148,5	13,27	86	7,69	9,84	0,73
Mg	1258,5	112,5	914	81,7	6,21	0,38
Fe	1555	139	1192,5	106,6	9,28	0,3
Cu	4694	419,59	4196	375,08	3,5	0,12
Ag	191,5	17,12	153,5	13,72	4,4	0,25
V	0,5	0,04			0	

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 55

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,2

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Al-Cu	204,5	18,28
-Fe-Cu	90,5	8,09
-Mg-Fe	84	7,51
-Mg-Cu	73	6,53
-Al-Mg	62,5	5,59
-Al-Fe	47,5	4,25
-Cr-Mg	34	3,04

Протокол №11 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла с ПКП двигателя Д-30КП2 №189-021, наработка 7 часов 31 минута

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 189021

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0

Организация: ПАО"НПО"Сатурн"

Наработка двигатель (часы): 7 (минуты): 31

Наработка масло (часы): 0 (минуты): 14

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: ПКП

Дата отбора пробы: 17.10.2018

Дата анализа: 18.10.2018 13:35:00

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц

Элемент	N, см3	Nпр, см3	Ср, г/т	Сч, г/т	С, г/т	D, мкм
Al	172,5	160	0	2,08	2,08	17,12
Cr	41	12,5	0	0,05	0,05	6,85
Ni	10	3	0	0,01	0,01	5,06
Mg	75,5	41,5	0,17	0,07	0,24	9,9
Fe	170	128,5	0,68	0,22	0,9	6,83
Cu	1525,5	1476	0,93	0,25	1,17	3,25
Ag	242	222,5	0	0,07	0,07	3,73
V	0		0	0	0	0

II. Состав и количество сложных

Количество составов сложных частиц:

Отношение количества сложных частиц к количеству простых:

Состав	Количество
-Cu-Ag	12
-Cr-Mg	10
-Cr-Fe	9
-Fe-Cu	8,5
-Mg-Cu	7
-Al-Cu	6,5
-Mg-Fe-Cu	6
-Ni-Fe	3,5
-Mg-Fe	2,5
-Cr-Mg-Fe-Cu-Ag	2
-Cr-Ni-Fe	2

Протокол №12 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе масла с ЗКП двигателя Д-30КП2 №189-021, наработка 7 часов 31 минута

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 189021

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0

Организация: ПАО"НПО"Сатурн"

Наработка двигатель (часы): 7 (минуты): 31

Наработка масло (часы): 0 (минуты): 14

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: ЗКП

Дата отбора пробы: 17.10.2018

Дата анализа: 18.10.2018 14:27:00

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	Nпр, см3	Ср, г/т	Сч, г/т	С, г/т	D, мкм
Al	258	244,5	0	0,42	0,42	10,47
Cr	56,5	32	0	0,02	0,02	4,86
Ni	6,5	2,5	0	0	0	4,21
Mg	83	59	0,2	0,03	0,23	6,91
Fe	209,5	183	0,83	0,31	1,14	7,1
Cu	2300	2255,5	1	0,33	1,33	3,12
Ag	321,5	300,5	0	0,06	0,06	3,18
V	0		0	0	0	0

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 27

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,05

Состав	Количество
-Cu-Ag	18
-Cr-Mg	8,5
-Al-Cu	6
-Cr-Fe	6
-Fe-Cu	6
-Mg-Cu	5,5
-Cr-Ni-Fe	2,5
-Mg-Fe-Cu	2,5
-Al-Fe	2
-Cr-Mg-Cu	2
-Al-Cr-Fe	1,5
-Mg-Fe-Cu-Ag	1,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Протокол №13 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в пробе смыва с МФС двигателя Д-30КП2 №189-021, наработка ППР 403 часа

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 189021

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0

Организация: ПАО"НПО"Сатурн"

Наработка ППР (часы): 403 (полетные циклы): 177

Наработка СНЭ (часы): 4013 (полетные циклы): 1760

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: МФС

Дата отбора пробы: 29.10.2018

Дата анализа: 23.11.2018 15:39:00

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	161	33,54	111	23,12	22,25	0,45
Cr	481	100,2	51,5	10,73	9,55	8,34
Ni	105	21,87	14	2,92	13,31	6,5
Mg	414,5	86,35	286	59,58	6,38	0,45
Fe	1749	364,34	1109	231,02	15,78	0,58
Cu	1231	256,43	887	184,77	4,8	0,39
Ag	619,5	129,05	309	64,37	7,45	1
V	39,5	8,23			0	

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 77

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,73

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Cr-Fe	182	37,91
-Fe-Ag	132,5	27,6
-Fe-Cu	56,5	11,77
-Cr-Fe-Cu	44	9,17
-Cr-Fe-Ag	41,5	8,64
-Ni-Cu	34,5	7,19
-Cr-Fe-Cu-Ag	31	6,46
-Mg-Cu	30	6,25
-Cu-Ag	19	3,96
-Mg-Fe	16,5	3,44

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Протокол №14 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в
пробе смыва с МФС двигателя Д-30КП2 №22-069, наработка ППР 166 часов

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп №: 22069

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0

Организация: ПАО"НПО"Сатурн"

Наработка ППР (часы): 166 (полетные циклы): 74

Наработка СНЭ (часы): 4459 (полетные циклы): 1823

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: МФС

Дата отбора пробы: 24.03.2017

Дата анализа: 23.11.2017 16:49:00

Количество параллельных измерений: 3

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	997,33	88,06	818,67	72,28	21,76	0,22
Cr	521,67	46,06	223,33	19,72	8,27	1,34
Ni	1916,67	169,23	722,33	63,78	18,04	1,65
Mg	2285,33	201,78	1713	151,24	8,67	0,33
Fe	1436,67	126,85	1047,67	92,5	8,29	0,37
Cu	3961	349,73	2580,67	227,85	4,52	0,53
Ag	204,33	18,04	151,67	13,39	7,32	0,35
V	3	0,26	0,33	0,03	0	8

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 88

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,56

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Ni-Cu	962,33	84,97
-Cr-Mg	122,67	10,83
-Mg-Cu	117,67	10,39
-Mg-Fe	94,33	8,33
-Fe-Cu	57	5,03
-Al-Mg	45,67	4,03
-Ni-Mg-Cu	45	3,97
-Cr-Fe	38	3,36
-Ni-Fe	38	3,36
-Al-Cu	34,67	3,06

**Протокол №15 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в
пробе смыва с МФС-30 двигателя Д-30КП2 №187-021**

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 187021

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0

Организация: ПАО"НПО"Сатурн"

Наработка двигатель (часы): 6 (минуты): 12

Наработка масло (часы): 1 (минуты): 44

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: МФС

Дата отбора пробы: 11.10.2018

Дата анализа: 17.10.2018 16:46:00

Количество параллельных измерений: 2

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	2867,5	419,9	2678	392,15	13,52	0,07
Cr	116	16,99	64,5	9,45	7,07	0,8
Ni	59	8,64	40	5,86	6,44	0,47
Mg	504,5	73,88	381	55,79	6,88	0,32
Fe	606,5	88,81	494	72,34	6,36	0,23
Cu	2515	368,28	2318	339,43	3,62	0,08
Ag	160	23,43	140,5	20,57	4,97	0,14
V	0,5	0,07			0	

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 40

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,12

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Al-Cu	97	14,2
-Al-Mg	51,5	7,54
-Fe-Cu	35,5	5,2
-Mg-Cu	29	4,25
-Cr-Fe	21	3,08
-Al-Fe	15,5	2,27
-Mg-Fe	10	1,46
-Cr-Mg	8,5	1,24
-Al-Mg-Cu	8	1,17

**Протокол №17 СВЧ плазменных измерений параметров частиц изнашивания в
пробе смыва с МФС-30 двигателя Д-30КП2 №190-041**

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 190041

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0

Организация: ПАО"НПО"Сатурн"

Наработка двигатель (часы): 5 (минуты): 29

Наработка масло (часы): 2 (минуты): 23

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: МФС

Дата отбора пробы: 14.10.2019

Дата анализа: 28.10.2019 16:41:00

Количество параллельных измерений: 1

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	RO	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
Al	576	95,07	506	83,51	9,02	0,14
Cr	123	20,3	51	8,42	5,97	1,41
Ni	78	12,87	36	5,94	13,05	1,17
Mg	509	84,01	387	63,87	4,24	0,32
Fe	846	139,63	678	111,9	5,74	0,25
Cu	3862	637,4	3684	608,02	3,97	0,05
Ag	65	10,73	59	9,74	3,11	0,1
V	0	0			0	

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 31

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,12

Состав	Кол-во	Рейтинг
-Fe-Cu	54	8,91
-Mg-Cu	38	6,27
-Al-Cu	33	5,45
-Mg-Fe	33	5,45
-Cr-Fe	23	3,8
-Al-Mg	15	2,48
-Cr-Ni-Fe	14	2,31
-Mg-Fe-Cu	12	1,98
-Al-Fe	8	1,32
-Cr-Mg	8	1,32

-Ni-Cu	7	1,16
-Cr-Ni	6	0,99
-Al-Mg-Cu	5	0,83
-Cr-Cu	5	0,83
-Cr-Ni-Fe-Cu	5	0,83
-Cu-Ag	5	0,83
-Ni-Fe	5	0,83
-Cr-Fe-Cu	3	0,5
-Al-Fe-Cu	2	0,33
-Al-Mg-Fe	2	0,33
-Cr-Mg-Fe	2	0,33
-Al-Cr-Mg-Cu	1	0,17
-Al-Cr-Ni-Mg-Fe-Cu	1	0,17
-Al-Cr	1	0,17
-Al-Mg-Ag	1	0,17
-Al-Mg-Fe-Cu	1	0,17
-Cr-Mg-Cu	1	0,17
-Cr-Ni-Cu	1	0,17
-Cr-Ni-Mg-Fe	1	0,17
-Ni-Fe-Cu	1	0,17
-Ni-Mg-Fe-Cu	1	0,17

**Протокол №16 СВЧ плазменных измерений параметров частиц
изнашивания в пробе смыва с маслофильтра двигателя Д-30КП2 №22-069**

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002

Двигатель: д30кп2 №: 22069

Номер борта: 0 Номер силовой установки: 3

Организация: ПАО"НПО"Сатурн"

Наработка ППР (часы): 161 (полетные циклы): 69

Наработка СНЭ (часы): 4454 (полетные циклы): 1818

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: МФС

Дата отбора пробы: 22.02.2017

Дата анализа: 16.03.2017 20:23:00

Количество параллельных измерений: 3

I. Параметры частиц износа.

Элемент	N, см3	R0	Nпр, см3	Rпр	D, мкм	V
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	0	9

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 101

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,84

Состав	Кол-во	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
-Ni-Fe	80	4,34

ПРИЛОЖЕНИЕ М

Титульный лист Методики диагностирования двигателей Д-30КП/КП2/КУ/КУ-154 при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным комплексом

СОГЛАСОВАНО

Директор ГосНИИ ГА


« 26 » 4 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
конструктора – главный конструктор
ПАО «ОДК-Сатурн»

В.А. Афонин

« ____ » ____ 2020 г.

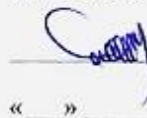
Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154

Методика диагностирования

двигателей при измерении параметров частиц изнашивания в пробах
масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным комплексом

МД-1-00-2020

Главный метролог ГосНИИ ГА


А.А. Богоявленский
« ____ » ____ 2020 г.Директор программы Д-30КП/КУ
ПАО «ОДК-Сатурн»Э.И. Конык
« ____ » ____ 2020 г.Директор ООО «Диагностические
технологии»
В.Г. Дроков
« ____ » ____ 2020 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Н**Список регламентирующих документов методики диагностирования**

1. САМ-ДТ-01-2. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.31.373.A № 63023 от 15.07.2016 г. Наименование типа СИ Анализаторы сцинтилляционные САМ-ДТ-01-2 Регистрационный № 64625-16. Методика поверки МП 07-251-2016. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1015 от 13.07.2016 г.
2. Методика поверки МП 07-251-2016. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1015 от 13.07.2016 г.
3. Бюллетень № 1756-БД-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. По вопросу: Применение сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей. Министерство транспорта РФ, 29.08.2000 г.
4. Бюллетень № 1772-БД-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. По вопросу: Применение сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей. Министерство транспорта РФ, 29.08.2001 г.
5. Бюллетень № 1786-БД-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. По вопросу: Применение сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей. Министерство транспорта РФ, 20.05.2003 г.
6. Бюллетень № 1827-БЭ-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. По вопросу: Продление срока действия бюллетеня № 1786-БД-Г по применению сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей/ ОАО «НПО Сатурн» РФ, 16.02.2006 г.
7. Бюллетень № 1840-БЭ-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. По вопросу: Продление срока действия бюллетеня № 1786-БД-Г по применению сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей ОАО «НПО Сатурн» РФ, 16.02.2007 г.

8. Бюллетень № 1854-БЭ-Г Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КУ-154. По вопросу: Продление срока действия бюллетеня № 1786-БД-Г по применению сцинтилляционного метода анализа масел для оценки технического состояния двигателей УНПЛГ ГВС "Ространснадзора" 02.04.2008, ОАО «НПО Сатурн» РФ, 2008 г

9. Анализатор сцинтилляционный САМ-ДТ-01-2. Руководство по эксплуатации САМ-ДТ-01-2-2016РЭ. ООО «Диагностические технологии», 2018, 67 с.

10. Рейтинги и показатели износа. Методика выполнения измерений сцинтилляционным эмиссионно-спектральным методом СТП ДТ-003-2004. Дополнение к МВИ СТП ДТ-001-2001 «Массовая доля металлов в масле авиационных газотурбинных двигателей», ФР.1.31.2001.00475 и МВИ СТП ДТ-002-2002 «Концентрация и размер металлических частиц в смазочном масле». Государственная система обеспечения единства измерений. Иркутск 2004 г. 11 с.

11. ГОСТ 12.2.007.0-75 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Изделия электротехнические. Общие требования безопасности (с Изменениями 1, 2, 3, 4) 2. Дата введения 1978-01-01.

12. ГОСТ 22261-94 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия (с Изменением 1). 5 издание, 2007 г.

13. Техническое указание № 1/53-2017. Изделие: Двигатель Д-30КП, Д-30КП-2. По вопросу: Применение сцинтилляционного метода анализа масла для оценки технического состояния двигателей СТП.503.135-2011 Приложение П, изм. 8. ПАО «НПО Сатурн». Управление зам. главнокомандующего ВКС. 2017 г.

14. Двигатель Д-30КП Инструкция по технической эксплуатации. КБ под руководством главного конструктора П.А. Соловьева, 1974.

15. ГОСТ 8505-80. Нефрас-С 50/170. Технические условия, 1981 г. (Изменение 3 от 01.01.1990, рег. 13.06.1989 г.)

16. Бюллетень № 384-БД-Г. Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2. По вопросу: Оценка технического состояния двигателя по содержанию металлических примесей в масле. ГУ ЭРАТ МГА 19.02.1986 г.

17. Бюллетень № 1935-БД. Изделие: Двигатели Д-30КУ, Д-30КУ-2, Д-30КП, Д-30КП-2, Д-30КУ-154. По вопросу:

а. Периодический вибрационный контроль межвального роликотоподшипника прибором-индикатором ИВУ-1М;

б. Отмена действия бюллетеней №№ 527-БУ-Г, 1527-БД-Г, 1528-БУ-Г, 1530-БУ-Г, 1615-БД-Г, 1642-БД-Г, 1757-БД-Г, 1794-БЭ-Г и технического указания № 25/53-93. УПЛГ ВС «Росавиации» 19.12.2013.

18. Бюллетень № 205.2.0.0852.02 (53.766БД). Изделие: Двигатели Д-30КП/КП-2, Д-30КП-Л/КП-2Л. По вопросу:

а. Оценка технического состояния двигателя по содержанию металлических примесей в масле с использованием рентгеноспектральных анализаторов БАРС-3, СПЕКТРОСКАН, БРА-17-02, ПРИЗМА.

б. Отмена действия бюллетеня № 205.1.0.0596.2 (541-БД-В)

19. Бюллетень № 205.5.0.0910.02 (53.800БД). Изделие: Двигатели Д-30КП, Д-30КП-2. По вопросу: Оценка технического состояния двигателя по содержанию металлических примесей в масле с использованием рентгеноспектральных анализаторов.

20. Массовая доля металлов в масле авиационных газотурбинных двигателей. Методика выполнения измерений сцинтилляционным эмиссионно-спектральным методом СТП ДТ-001-2001, Иркутск 2001г. Свидетельство об аттестации МВИ № 04-2001/

21. Концентрация и размер металлических частиц в смазочном масле. Методика выполнения измерений сцинтилляционным эмиссионно-спектральным методом СТП ДТ-002-2002, Иркутск 2002г. Свидетельство об аттестации МВИ № 01-2002. Дополнение к МВИ СТП ДТ-001-2001 «Массовая доля металлов в масле авиационных газотурбинных двигателей», ФР.1.31.2001.00475.

ПРИЛОЖЕНИЕ П

Фрагмент статистической модели исправного двигателя. Параметры частиц изнашивания в пробах масла (ЗКП) и смывах с фильтра (МФС) исправных двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ154 при наработке 1-500 ч ППР

Модель № 1							
Тип двигателя: Д-30КП/КП-2, Тип пробы: масло с ЗКП, ППР 1 ч - 500 ч							
Параметр, состав	Хсред.	Sr	Хмакс.	Кол-во	Вер-ть	Х+2 σ	Х+3 σ
1	2	3	4	5	6	7	8
Количество частиц изнашивания Nобщ, см ⁻³							
Al-	96,56	130,99	882,00	337	0,99	1110	6906
Cr-	33,14	80,35	1347,00	321	0,94	406	2633
Ni-	9,78	26,86	452,50	336	0,99	48	156
Mg-	111,65	339,27	3851,00	340	1,00	476	1468
Fe-	146,94	203,03	2170,50	340	1,00	908	3149
Cu-	1014,86	1176,68	7830,33	340	1,00	6448	22422
Ag-	206,38	210,58	1089,00	340	1,00	1330	4542
V-	0,88	1,52	12,50	68	0,20	2,24	4,2
Количество простых частиц изнашивания Nпр, см ⁻³							
Al-	89,20	119,92	758,67	335	0,99	1050	6697
Cr-	13,96	18,51	245,50	278	0,82	94,4	341,3
Ni-	4,08	7,30	112,00	312	0,92	13,3	29,5
Mg-	83,61	256,47	3506,00	340	1,00	350,2	1049
Fe-	117,17	135,68	1146,50	340	1,00	754,1	2626
Cu-	974,21	1096,39	7419,33	340	1,00	6268	21866
Ag-	192,12	190,02	963,50	340	1,00	1263	4339
V-	1,33	0,70	3,00	23	0,07	2,67	3,95
Размер частиц изнашивания D, мкм							
Al-	12,90	6,40	41,24	337	0,99	29,74	47,70
Cr-	5,19	2,65	14,35	321	0,94	15,78	29,83
Ni-	5,31	3,48	20,93	338	0,99	21,75	50,31
Mg-	6,58	1,96	13,75	340	1,00	11,74	16,05
Fe-	7,50	2,76	24,58	340	1,00	13,73	19,12
Cu-	3,32	0,70	8,61	340	1,00	4,78	5,78
Ag-	4,28	1,08	9,79	340	1,00	6,71	8,53
Содержание в растворе Ср, г/т							
Ni-	0,15	0,06	0,18	5	0,01	0,44	0,81
Mg-	0,21	0,20	1,41	277	0,81	1,23	3,75
Fe-	0,57	0,49	2,81	294	0,86	4,16	14,73
Cu-	0,62	0,49	1,89	294	0,86	5,16	19,76
Ag-	0,06	0,05	0,17	30	0,09	0,41	1,39

Содержание в частицах изнашивания Сч, г/т							
Al-	0,25	0,34	2,15	321	0,94	2,38	11,53
Cr-	0,07	0,15	1,45	219	0,64	0,53	2,36
Ni-	0,05	0,12	1,32	211	0,62	0,34	1,65
Mg-	0,04	0,15	2,00	311	0,91	0,14	0,42
Fe-	0,29	0,47	5,52	338	0,99	1,97	7,78
Cu-	0,16	0,20	2,31	336	0,99	0,78	2,25
Ag-	0,09	0,09	0,47	332	0,98	0,52	1,64
Количество сложных частиц Нсл, см ⁻³							
Cu-Ag-	9,21	13,23	129,00	303	0,89	44,73	135,6
Mg-Fe-	2,64	3,07	36,33	302	0,89	7,37	14,07
Fe-Cu-	8,75	18,88	180,67	287	0,84	39,49	128,27
Mg-Cu-	13,08	110,70	1849,0	279	0,82	33,62	102,60
Ni-Fe-	2,73	3,64	35,67	252	0,74	8,17	16,79
Cr-Fe-	7,35	9,26	118,50	241	0,71	34,39	93,75
Cr-Mg-	7,92	8,21	61,67	229	0,67	38,33	106,39
Al-Mg-Fe-	1,22	0,45	3,00	174	0,33	2,07	2,77
Cr-Fe-	1,19	0,45	4,00	154	0,29	1,98	2,62
Ni-Cu-	1,11	0,30	2,00	137	0,26	1,66	2,05
Cr-Ni-Fe-	1,07	0,25	2,00	101	0,19	1,50	1,79
Al-Cu-	1,10	0,32	3,00	101	0,19	1,63	2,01
Cr-Mg-	1,13	0,40	3,00	99	0,19	1,79	2,29
Al-Fe-	1,10	0,29	2,00	92	0,17	1,62	1,99
Mg-Cu-Ag-	1,22	0,61	5,00	88	0,17	2,14	2,93
Mg-Fe-Cu-Ag-	1,20	0,43	3,00	82	0,16	2,01	2,67
Mg-Ag-	1,16	0,35	2,00	64	0,12	1,83	2,35
Fe-Cu-Ag-	1,14	0,40	3,00	53	0,10	1,82	2,34
Al-Mg-Fe-Cu-	1,08	0,27	2,00	53	0,10	1,53	1,83
Mg-Fe-Cu-	3,87	24,45	361,50	217	0,64	7,61	15,45
Al-Cu-	4,84	7,60	81,33	204	0,60	18,90	48,57
Cr-Ni-Fe-	2,49	2,95	37,50	203	0,60	6,74	12,54
Al-Mg-	1,98	3,15	31,33	184	0,54	4,82	8,72
Al-Fe-	1,80	1,24	7,00	174	0,51	4,47	7,67
Ni-Cu-	1,59	1,47	15,00	160	0,47	3,59	5,87
Fe-Ag-	4,73	25,67	245,00	142	0,42	7,36	15,83
Cr-Mg-Fe-Cu-	4,29	26,13	313,00	142	0,42	7,81	16,26
Cr-Fe-Cu-	1,87	2,19	23,00	135	0,40	4,54	7,88
Cr-Cu-	1,83	2,63	29,00	133	0,39	4,23	7,20
Cr-Ni-	1,37	1,08	12,00	126	0,37	2,62	3,82
Cr-Mg-Cu-	2,48	10,32	117,00	126	0,37	4,75	8,60
Al-Cr-Fe-	2,12	1,52	9,00	124	0,36	5,65	10,14
Cr-Mg-Fe-Cu-Ag-	2,71	8,91	98,00	119	0,35	6,40	12,63
Al-Ag-	1,77	1,06	6,33	113	0,33	4,10	6,68

Al-Cr-	1,43	0,87	7,00	106	0,31	2,97	4,50
Mg-Cu-Ag-	2,12	8,67	89,00	103	0,30	3,65	6,31
Mg-Ag-	1,55	1,28	7,67	98	0,29	3,48	5,67
Al-Mg-Cu-	1,49	3,09	31,50	98	0,29	2,74	4,18
Cr-Mg-Fe-	1,22	0,56	4,00	95	0,28	2,16	2,97
Mg-Fe-Cu-Ag-	1,59	3,34	33,00	92	0,27	3,08	4,89
Al-Mg-Fe-	1,20	0,45	3,00	88	0,26	2,05	2,74
Cr-Ni-Fe-Cu-	1,35	1,25	11,50	79	0,23	2,63	3,90
Ni-Fe-Cu-	1,31	0,85	5,67	67	0,20	2,55	0,76
Fe-Cu-Ag-	1,81	2,56	15,50	60	0,18	4,42	8,04
Al-Cr-Mg-Fe-Cu-Ag-	1,59	1,88	14,50	56	0,16	3,45	5,59
Al-Cr-Ni-Fe-	1,31	0,65	4,00	55	0,16	2,49	3,57
Al-Cr-Mg-	1,13	0,34	2,00	53	0,16	1,76	2,23
Al-Fe-Cu-	1,25	0,59	4,00	51	0,15	2,26	3,15
Al-Mg-Fe-Cu-	1,36	1,58	11,50	46	0,14	2,70	4,14
Cr-Ni-Mg-Fe-Cu-Ag-	2,47	8,83	59,00	43	0,13	4,37	8,36
Al-Cr-Ni-Mg-Fe-Cu-Ag-	2,04	6,32	41,50	41	0,12	3,73	6,77
Al-Cr-Mg-Fe-Cu-	1,81	3,94	25,00	37	0,11	3,87	6,91
Cr-Ag-	1,24	0,52	3,00	33	0,10	2,23	3,07
Cr-Ni-Mg-Fe-Cu-	3,05	10,57	58,00	29	0,09	5,66	12,18
Cr-Fe-Ag-	1,18	0,61	4,00	28	0,08	2,06	2,81

ТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального конструктора по эксплуатации
АО «ОДК-Авиадвигатель»
Уткин П.А.
2024г.



АКТ

**Об использовании результатов кандидатской диссертационной работы по теме
«Разработка и совершенствование СВЧ плазменного метода для диагностирования
технического состояния узлов трения авиационных ГТД Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 на всех
этапах жизненного цикла»**

Дрокова Виктора Владиславовича

Разработанная в диссертационной работе Дрокова Виктора Владиславовича «Методика диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным комплексом» адаптирована для диагностирования двигателей ПС-90А и ПД-14.

Большое количество определяемых параметров диагностического материала, раздельное измерение величины содержания металлической примеси, находящейся в двух формах – растворимой и частицах изнашивания, учет параметров частиц, накопленных на основном маслофильтре, при выявлении «проскальзывания» роликоподшипника ТВД показало достоверность 73% (на примере диагностирования 15 двигателей ПС-90А-76).

Разработана статистическая модель исправного двигателя ПД-14 по диагностическим данным, полученным при стендовых испытаниях.

На АО «ОДК-Авиадвигатель» поставлен СВЧ плазменный анализатор САМ-ДТ-01-2 и ведутся работы по опытно-промышленной эксплуатации.

Для использования разработанной технологии диагностирования СВЧ плазменным методом создана учебная программа по использованию СВЧ плазменного анализатора для диагностических целей. Проведено обучение сотрудников АО «ОДК-Авиадвигатель» по работе с СВЧ плазменным анализатором для оценки технического состояния двигателей ПС-90А и ПД-14 по параметрам частиц изнашивания в пробе масла и смыва с маслофильтра.

В настоящий момент, в инициативном порядке, ведутся работы по разработке технологии контроля технического состояния двигателя ПД-35. В рамках работы используется диагностического материала из маслосистемы и газозооушного тракта. Анализ диагностического материала проводится с использованием спектрометра САМ-ДТ.

Начальник КО-403

Заместитель начальника отдела
по специальным видам диагностики

Ногин А.В.
Блинов А.В.



ПРИЛОЖЕНИЕ С**Титульный лист Учебной программы подготовки специалистов для работы на
СВЧ плазменном анализаторе САМ-ДТ-01-2**

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ



г. Иркутск

УТВЕРЖДАЮ:
Генеральный директор:

16.01.2024  **В. Г. Дроков**


УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

**Подготовки специалистов для работы на СВЧ плазменном анализаторе
САМ-ДТ-01-2**

ИРКУТСК – 2024 г.



Список исполнителей, участвовавших в разработке Учебной программы
подготовки специалистов для работы на СВЧ плазменном анализаторе
САМ-ДТ-01-2

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ



г. Иркутск

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ:

Генеральный директор,
д-р технических наук

подпись, дата

В.Г. Дроков
Раздел 1,4

Старший научный
сотрудник, к.х.н.

подпись, дата

Ю.Д. Скудаев
Раздел 3,4

Инженер

подпись, дата

В.В. Дроков
Раздел 1,2,4

Инженер

подпись, дата

В.В. Мурыщенко
Раздел 3,4

Научн. сотр.

подпись, дата

Е.Н. Карасева
Раздел 3