

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Иркутский государственный университет» (ИГУ)

На правах рукописи



Мурыщенко Владимир Валерьевич

**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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Дроков Виктор Григорьевич

Иркутск – 2024

Содержание

| | Стр. |
|--|-----------|
| Введение | 4 |
| | |
| Глава 1. Спектральная аппаратура для контроля технического состояния узлов трения авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) по параметрам частиц изнашивания | 14 |
| 1.1 Атомно-эмиссионный метод измерения количества металлической примеси (стружки) в пробе масла | 14 |
| 1.2. Рентгенофлуоресцентный метод измерения содержания металлической примеси в пробе масла | 17 |
| 1.3. Микрорентгеноспектральный метод измерения параметров частиц | 21 |
| 1.4. СВЧ плазменный метод анализа частиц изнашивания | 24 |
| 1.4.1. Блок-схема СВЧ плазменного анализатора и измеряемые параметры при анализе пробы масла. | 25 |
| 1.4.2. Диагностические параметры при анализе пробы смыва с маслофильтра..... | 29 |
| 1.4.3. Метрологическое обеспечение методов контроля технического состояния узлов трения авиационных ГТД по параметрам частиц изнашивания | 32 |
| 1.4.4. Устройство для распыления и подачи пробы масла в плазму..... | 36 |
| 1.5. Выводы по главе..... | 41 |
| | |
| Глава 2. Оценка влияния характеристик СВЧ плазменного источника возбуждения спектров на формирование аналитического сигнала ... | 43 |
| 2.1. Моделирование функции распределения СВЧ плазменных сигналов..... | 45 |
| 2.2. Обсуждение результатов расчетов..... | 48 |
| 2.3. Экспериментальная оценка влияния размеров металлических частиц на полноту их испарения в потоке СВЧ плазмы. | 54 |

| | |
|---|------------|
| 2.4. Выводы по главе..... | 58 |
| Глава 3. Разработка устройства ввода пробы масла в плазму и совершенствование способа регистрации импульсных сигналов..... | 59 |
| 3.1. Ультразвуковой распылитель масляных проб..... | 59 |
| 3.1.1. Расчет колебаний распыляющей иглы, изогнутой под прямым углом к оси акустического волновода | 60 |
| 3.2. Экспериментальная оценка размеров капель золя в зависимости от температурных условий распыляемого масла | 73 |
| 3.2.1. Экспериментальная оценка размеров капель золя в зависимости от температурных условий распыляемого масла | 74 |
| 3.3. Оптимизация условий измерения элементного состава при СВЧ плазменных измерениях..... | 86 |
| 3.4. Выводы по главе..... | 94 |
| Глава 4. Разработка экспериментальной методики диагностирования двигателей Д–30КП/КП–2 при проведении приемосдаточных испытаний по результатам измерения параметров частиц изнашивания СВЧ плазменным методом..... | 95 |
| 4.1.Обоснование возможности использования СВЧ плазменного метода в качестве контрольного при проведении ПСИ..... | 99 |
| 4.2. Статистическая эталонная модель исправного двигателя Д–30КП/КП–2, прошедшего приёмосдаточные испытания (ПСИ) | 102 |
| 4.3. Обсуждение результатов | 106 |
| 4.4. Выводы по главе..... | 116 |
| Основные результаты и выводы | 119 |
| Список литературы | 122 |
| Приложение А | 135 |

Введение

Актуальность темы исследования. Сведения по эксплуатации авиационных двигателей Д30-КП/КП2 показывают, что часть повреждений, связанных с отказами узлов маслосистемы, с наибольшей вероятностью происходит на начальных этапах работы двигателя. Так, согласно [1] по браковочному признаку «стружка в масле» из эксплуатации было возвращено 12% двигателей с наработкой менее 100 часов. Примерно такой же процент отказов узлов маслосистемы наблюдался и в диапазоне наработок 100-500 часов. По результатам заводских исследований установлено, что большинство событий связано с качеством изготовления деталей, правильностью сборки сопряжений, нагрузкой, температурой поверхностей узлов трения, качеством смазки и др. причинами.

Проблема отказов при малой наработке известна и связана с процессом приработки деталей двигателя [2]. Тем не менее, большое количество публикаций до настоящего времени, посвященных вопросам приработки, свидетельствует о том, что эта проблема актуальна, не снята с повестки дня и данная технологическая операция играет важную роль в повышении надежности двигателей [3–5].

Приемосдаточные испытания (ПСИ) авиационного двигателя проводятся на стенде обычно в течение 6–15 часов, после чего двигатель отправляется в эксплуатацию. Очевидно, что для части двигателей такого количества времени недостаточно для полного завершения процесса приработки. Вдобавок на этапе стендовых испытаний практически невозможно по параметрам частиц изнашивания отличить процесс приработки от начала повышенного износа [6; 7].

В этой связи высказано предположение, что, возможно, часть двигателей, возвращенных в ремонт по признаку «стружке в масле» отправлялись в эксплуатирующие организации с начальными признаками повреждений,

развитие которых в процессе эксплуатации приводило к досрочному съёму двигателя.

Наиболее вероятной причиной повышенного уровня отказов двигателей в начале их эксплуатации является несовершенство методов контроля технического состояния при заводских испытаниях новых, либо отремонтированных двигателей. Данное обстоятельство приводит к тому, что двигатели со скрытыми повреждениями выходят из строя вскоре после начала работы.

В настоящее время для контроля технического состояния авиадвигателей после приемосдаточных испытаний используют вибрационный анализ, осмотр контрольных элементов на предмет металлической стружки и спектральные методы. Если ни по одному из способов нет замечаний, то двигатель направляется в эксплуатацию. Длительный опыт применения регламентированных спектральных методов для оценки технического состояния авиадвигателей показал недостаточную достоверность результатов диагностирования при проведении ПСИ [1; 8].

В качестве высокоэффективного способа контроля технического состояния авиадвигателей с малой наработкой и контроля качества выпускаемой продукции предложено использовать СВЧ плазменный (сцинтилляционный) метод [8]. Применение данного метода в эксплуатирующих организациях для выявления повреждений узлов маслосистемы двигателей Д30-КП/КУ/КУ-154 показало его высокую эффективность, подтвержденная достоверность диагностирования составляет не менее 90% [9]. Важно отметить, что ранее СВЧ плазменный метод не использовался для контроля технического состояния авиадвигателей при проведении ПСИ.

Несмотря на полученные высокодостоверные диагностические результаты в эксплуатации, опыт применения СВЧ плазменного анализатора выявил конструктивные недоработки, влияющие на его аналитические и диагностические возможности. Так практически не были исследованы вопросы

связи импульсного аналитического сигнала с размером частицы изнашивания, достоверности измерения элементного состава частиц. Кроме того, с точки зрения технической надежности работы анализатора было необходимо создание новой конструкции распылителя масляных проб. Применяемая ранее конструкция выходила из строя через непредсказуемо малые промежутки времени (от нескольких минут до нескольких десятков часов).

Таким образом, диссертационное исследование состоит из двух частей, первая часть посвящена решению вопросов, связанных с аналитическими и диагностическими возможностями СВЧ плазменного анализатора, совершенствованием конструкции его отдельных узлов, вторая – разработке технологии диагностирования авиационных двигателей при проведении приёмосдаточных испытаний по результатам СВЧ плазменных измерений.

Степень разработанности темы исследования. Анализ литературных данных и опыт работы с ведущими моторостроительными предприятиями показал, что в настоящее время отсутствует эффективное спектральное оборудование и методики оценки технического состояния авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) с наработкой до 15 часов.

Цель научно-квалификационной работы заключается в совершенствовании СВЧ плазменного метода и использование его для контроля технического состояния авиационных двигателей при проведении приёмосдаточных испытаний с целью снижения досрочно возвращаемых из эксплуатации двигателей с малой наработкой.

Объектом исследования выступает СВЧ плазменный метод.

Предметом исследования является применение СВЧ плазменного метода для оценки технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, проходящих приёмосдаточные испытания после их ремонта и технического обслуживания.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. проведена теоретическая и экспериментальная оценка влияния размеров металлических частиц на выходной импульсный сигнал при

- измерении массовой доли элементов. Определена граница размеров полной испаряемости металлических частиц;
2. предложено использование параметра суммы квадратов площадей импульсных сигналов (M_2) в качестве аналитического параметра, снижающего влияние размеров частиц на выходной сигнал анализатора;
 3. проведена качественная оценка достоверности определения элементного состава частиц изнашивания при СВЧ плазменных измерениях с помощью независимого микрорентгеноспектрального метода анализа;
 4. теоретически обоснована и экспериментально подтверждена надежность и эффективность новой конструкции распылителя при вводе пробы в источник возбуждения спектров СВЧ плазменного анализатора;
 5. по результатам СВЧ плазменного анализа проб масел и смывов с маслофильтра определены граничные значения по параметрам частиц изнашивания, характерные для исправного двигателя (эталонного двигателя), прошедшего приёмосдаточные испытания;

Методология и методы исследования. Получение экспериментальных данных и разработка подходов оценки технического состояния авиационных двигателей выполнены на СВЧ плазменном анализаторе САМ–ДТ–01–2. Аттестована методика измерений массовой доли для магния, железа, меди в форме растворённой примеси (свидетельство об утверждении типа средств измерений рег. № 64278–16).

Расчетные данные по возможности использования M_2 в качестве аналитического параметра при регистрации импульсных сигналов проводились с использованием метода Монте-Карло.

Экспериментальные данные по испаряемости металлических частиц микронных размеров в СВЧ плазме выполнены на натуральных металлических частицах, выделенных из проб масел и смывов с маслофильтров.

Для расчетов конструкции ультразвукового распылителя использовался программный продукт ANSYS Workbench (R19.0 Academic, R19.2 Academic, ANSYS Inc., США). Новизна разработки подтверждена патентом РФ №193338 «Ультразвуковой распылитель».

Качественная оценка достоверности измерения элементного состава металлических частиц СВЧ плазменным методом проводилась сравнением результатов, полученных на электронном рентгеноспектральном микроанализе (ЭРСМА) JXA-8200 (Jeol Ltd., Япония).

Статистическая обработка результатов СВЧ плазменных измерений, нахождение параметров частиц изнашивания характерных для исправного двигателя, прошедшего приёмосдаточные испытания, а также расчёт критериев отклонения параметров частиц изнашивания от параметров эталонного двигателя, прошедшего приёмосдаточные испытания проводились с применением стандартных пакетов статистической обработки данных – STATISTICA (Version 10, Start Soft Inc., США).

Диссертационная работа выполнена в соответствии с **паспортом по научной специальности 2.2.8.** – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» (п.3 – Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды; и п.4 – Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. по результатам экспериментальных исследований установлено, что при использовании СВЧ плазмотрона в качестве источника

возбуждения спектров распределение импульсных (сцинтилляционных) сигналов не повторяет распределение частиц по размерам. По величине единичного сцинтилляционного сигнала невозможно оценить испарившуюся массу частицы и, соответственно, эквивалентный размер частицы;

2. теоретически выяснено и экспериментально подтверждено, что использование в качестве аналитического параметра M_2 снижает влияние размеров частиц на регистрируемый аналитический сигнал. Влияние размеров частиц на аналитический сигнал при измерении массовой доли отсутствует при размерах частиц до 20 мкм;
3. теоретически обосновано и экспериментально показано, что при обработке импульсных сигналов сокращение интервала совпадения импульсов на разных каналах от начала импульса до 100 мкс позволило достичь достоверности определения элементного состава частиц изнашивания не менее 96%;
4. экспериментально установлено, что использование распыляющего капилляра в распылителе изогнутого с радиусом изгиба 8 мм под прямым углом к оси акустического волновода снижает нагрузку в точке крепления распыляющего капилляра, чем достигается необходимый рабочий ресурс распылителя;
5. разработаны статистические эталонные модели исправных двигателей по пробе масла и смыва с маслофильтра при наработках двигателя до 15 часов, используемые для сравнения в процессе последующего диагностирования испытуемых двигателей.

Теоретическая и практическая значимость.

1. теоретические и экспериментальные данные по влиянию характеристик источника возбуждения спектров на испаряемость металлических частиц и выбор аналитического параметра носят фундаментальный характер и могут быть применены в различных областях науки;

2. результаты по оценке достоверности определения элементного состава металлических частиц изнашивания, которые могут быть применены в дальнейших исследованиях при разработке методов диагностирования воздушной и наземной техники;
3. оригинальная конструкция распылителя жидких проб, с ресурсом работы не менее 2 500 часов, может быть использована не только в аналитическом приборостроении, но и других областях науки и техники;
4. использование разработанных подходов и критериев оценки технического состояния, новых и ремонтных авиадвигателей, прошедших приёмосдаточные испытания, позволит повысить качество выпускаемой продукции и безопасность полетов;
5. новые подходы по оценке технического состояния авиационных двигателей, прошедших приёмосдаточные испытания апробированы на парке двигателей Д-30КП/КП-2 в рамках выполнения работ по ТУ 1/53-2017 для ПАО «ОДК-Сатурн»;
6. в рамках выполнения совместных работ на ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск) поставлен СВЧ плазменный анализатор САМ-ДТ-01. На АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь) поставлен и внедрен в производственный СВЧ плазменный анализатор САМ-ДТ-01-2.

Положения, выносимые на защиту:

1. теоретические и экспериментальные результаты по влиянию размеров частиц на выходной сигнал при СВЧ плазменных измерениях. Предложен параметр M_2 , снижающий влияния размеров частиц изнашивания при измерении массовой доли;
2. оригинальное устройство, защищенное патентом на полезную модель для подачи и распыления жидких проб в источник возбуждения спектров. Проведенные в течении нескольких лет в испытания разработанный конструкции распылителя выявили его ресурс не менее 2 500 часов, сравнимый с наработкой СВЧ генератора плазмы;

3. способ оптимизации условий измерения элементного состава СВЧ плазменным методом позволил экспрессно получать информацию о составе частиц и отказаться от дорогостоящих, длительных измерений микрорентгеноспектральными методами;
4. статистические эталонные модели исправного двигателя при проведении приёмосдаточных испытаний, по результатам СВЧ плазменного анализа проб масел и смывов с маслофильтра. Разработанные эталонные модели позволили количественно оценивать отклонение параметров исследуемого двигателя от эталонного. Уровень отклонений позволяет судить о техническом состоянии двигателя.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивается корректным применением современного математического аппарата, постановкой дополнительных специальных экспериментов, корректной статистической обработкой полученных данных и их верификацией сторонними методами. Достоверность разработанных подходов оценки технического состояния авиационных двигателей при проведении приёмосдаточных испытаний, оценивалась путём сравнения результатов СВЧ плазменных измерений с результатами заводских исследований двигателей.

Апробация работы.

1. Результаты работы представлялись на совещаниях в АО «ОДК» и на совещаниях рабочих групп с двигателестроительными организациями.
2. Основные результаты работы доложены на международных и всероссийских конференциях с международным участием:
 - XVI международном симпозиуме «Применение анализаторов МАЭС в промышленности» – 14-16 августа 2018, Новосибирск;
 - XI Всероссийской научной конференции и школы «Аналитика Сибири и Дальнего востока» – 16-20 августа 2021, Новосибирск;

- XVI Международной научно-практической конференции «International Conference on Aviation Engineering» – 3-7 июля 2023, Иркутск;
- V всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств» 14 декабря 2023, Омск.

Публикации. Основные результаты работы представлены в 20 печатных изданиях, из которых 6 – изданы в журналах, рекомендуемых ВАК, 3 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science, 4 – публикации в трудах международных и всероссийских конференций с международным участием, а также в 6 патентах РФ и 1 – свидетельство на регистрацию программы ЭВМ.

Личный вклад автора. Подготовка исходных данных и участие в проведении расчетов. Планирование и проведение экспериментов с различными размерными фракциями металлических частиц при оценке влияния передаточной функции СВЧ плазмотрона на выходной импульсный сигнал, проведение экспериментов по испаряемости частиц в потоке плазмы.

Проведение экспериментов по оценке достоверности определения элементного состава частиц изнашивания при СВЧ плазменных измерениях.

Разработка нового устройства для распыления и введения жидких проб в источник возбуждения спектров, экспериментальная оценка возможностей и апробация нового распылителя жидких проб.

Подготовка и анализ проб масел и смывов с маслофильтра из двигателей Д-30КП/КП-2, обработка и обсуждение полученных результатов, расчет статистических моделей исправного двигателя выполнены лично или при непосредственном участии автора.

Написание и оформление публикаций выполнено лично или при непосредственном участии автора.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

Полный объем диссертации составляет 136 страниц, включая 48 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 94 наименования.

Глава 1. Спектральная аппаратура для контроля технического состояния узлов трения авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) по параметрам частиц изнашивания

Принцип диагностирования спектральными методами узлов ГТД, омываемых смазочным маслом, заключается в следующем. В исправном двигателе величина массовой доли металлической примеси в пробе масла с увеличением наработки не меняется. В случае возникновения повреждения величина массовой доли металлической примеси с наработкой начинает увеличиваться и при достижении установленного граничного значения двигатель признается неисправным.

Наибольшее распространение для контроля состояния ГТД получили классические атомно-эмиссионный и рентгеноспектральный методы. Меньше распространен микрорентгеноспектральный метод, вследствие длительного процесса пробоподготовки и высокой стоимости аппаратуры. В последние годы для диагностирования авиадвигателей начинает использоваться СВЧ плазменный (сцинтилляционный) метод анализа. Ниже предпринята попытка оценить ограничения и достоинства диагностических возможностей каждого из названных методов.

1.1 Атомно-эмиссионный метод измерения количества металлической примеси (стружки) в пробе масла

При выполнении измерений атомно-эмиссионным методом пробу масла вводят в источник возбуждения спектров (ИВС), дуговой разряд [10–12]. Интенсивность излучения линий спектра пропорциональна содержанию химического элемента в данной пробе. Для определения содержания отдельных элементов в пробе масла производится измерение интенсивности выбранных

спектральных линий и сравнения их с интенсивностью линий, специально приготовленных для этих целей эталонов.

Подача пробы в источник возбуждения спектров осуществлялась двумя способами: испарением из кратера нижнего угольного электрода и с помощью вращающегося электрода [10–12].

Необходимо отметить, что в случае испарения пробы из кратера нижнего электрода большой вклад в погрешность измерений вносила неоднородность пробы. В пробе масла могут находиться частицы изнашивания различного размера от долей микрометров до нескольких сотен микрометров. Поскольку сигнал пропорционален испарившейся массе, то одна крупная частица могла дать сигнал в несколько раз больше чем все мелкие частицы. В таких случаях воспроизводимость результатов превышала 100%. Для снижения влияния неоднородности пробы на воспроизводимость использовался критериальный признак, согласно которому в ходе анализа пробы масла из нескольких параллельных измерений аномально большое значение исключалось из выборки [10]. Такой подход к обработке результатов с одной стороны, позволял снизить влияние погрешности неоднородности пробы на воспроизводимость результатов, с другой – исключалась информация о параметрах крупных частиц изнашивания, которая могла свидетельствовать о начале повышенного износа. По сути, улучшение воспроизводимости измерений приводило к потере диагностической информации и, как следствие, снижению достоверности оценки технического состояния авиадвигателя.

Методика анализа пробы масла с использованием вращающегося дискового электрода позволяла снизить влияние неоднородности пробы [11; 12]. Вращающийся электрод помещался в ванночку, в которую наливалась проба масла. При вращении электрода частицы изнашивания задерживались на его поверхности и равномерно подавались в источник возбуждения спектров. При этом, во время проведения анализа дисковый электрод разогревался и нагревал анализируемое масло. При нагревании масла его вязкость снижалась, только малая часть крупных частиц попадала в ИВС, большая их часть

осаждалась на дно ванночки и таким образом, в основном, анализировались мелкие частицы изнашивания. За счет такого способа подачи пробы была достигнута погрешность воспроизводимости не превышающая значения 10%. Считается, что при подаче пробы в разряд дисковым электродом метод эффективен с диагностической точки зрения, если размер частиц изнашивания не превышает 8–10 мкм [13; 14]. Современным представителем атомно-эмиссионных анализаторов с подачей пробы в разряд вращающимся электродом является МФС-11(рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Атомно-эмиссионный спектрометр МФС-11

Атомно-эмиссионный метод характеризуется достаточно высоким пределом обнаружения (около 1г/т) [15], поэтому вся действующая нормативная диагностическая документация рассчитана на измерение массовой доли всего двух элементов основы сплавов, железа и меди [10; 11]. Для измерения легирующих компонентов (Cr, Ni, V и др.), содержание которых в

5–10 раз ниже основы сплавов необходимо снижение пределов количественного определения метода.

Таким образом, оба описанных выше способа подачи пробы в ИВС обладают существенным недостатком. В случае испарения пробы масла из кратера нижнего электрода диагностическая информация от крупных частиц исключалась, а в случае использования методики с применением дискового вращающегося электрода информацию от крупных частиц просто не получали. Рассмотренные варианты атомно-эмиссионного метода позволяют измерять величину массовой доли только субмикронных частиц, не учитывая вклад в общее содержание крупных частиц. Выделение в смазочное масло крупных частиц может свидетельствовать о начале развития повреждения, потеря информации о параметрах крупных частиц и их вклада в массовую долю одна из причин недостаточной достоверности диагностического решения.

1.2. Рентгенофлуоресцентный метод измерения содержания металлической примеси в пробе масла

Практически одновременно с атомно-эмиссионным методом в авиационной отрасли при оценке состояния ГТД начал использоваться рентгенофлуоресцентный метод анализа. Главным преимуществом метода являлась компактность анализаторов, при чувствительности не хуже, чем у атомно-эмиссионных спектрометров. Распространение получили рентгенофлуоресцентные анализаторы типа БАРС-3, "СПЕКТРОСКАН", БРА-17, среди которых наибольшее распространение получил автоматизированный диагностический комплекс (АДК) «Призма» (рис. 1.2) [16].

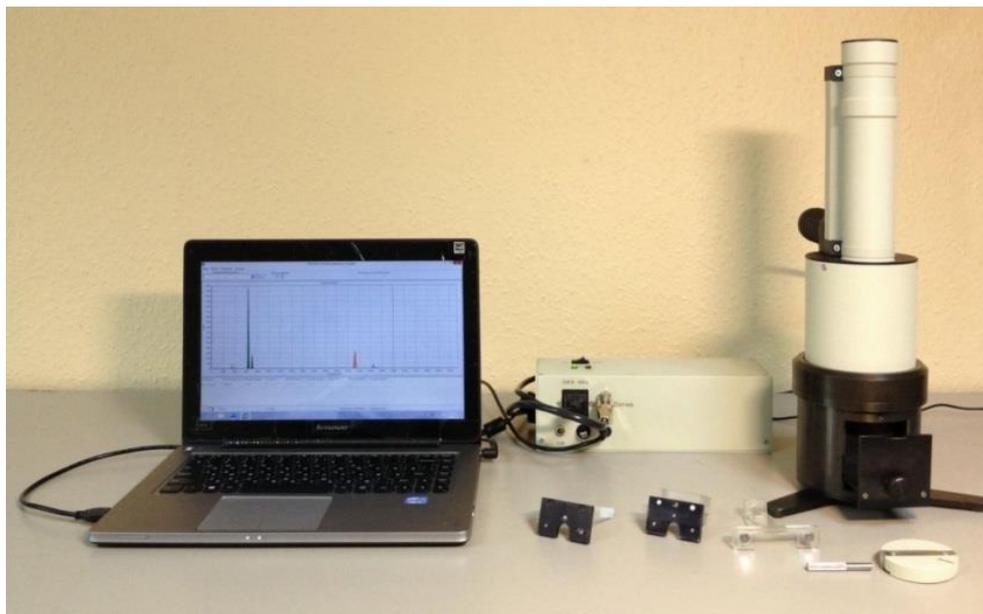


Рисунок 1.2 – Рентгенофлуоресцентный анализатор АДК «Призма»

Суть рентгенофлуоресцентного метода анализа заключается в том, что при облучении, выделенных из пробы масла металлических частиц изнашивания мощным потоком излучения рентгеновской трубки возникает характеристическое флуоресцентное излучение атомов, пропорциональное их концентрации в образце. Излучение разлагается в спектр при помощи кристалл-анализаторов, далее с помощью детекторов и счетной электроники измеряется его интенсивность. Математическая обработка спектра позволяет проводить количественный и качественный анализ [16–20].

При использовании рентгенофлуоресцентных анализаторов для оценки состояния ГТД была разработана специальная методика подготовки проб к анализу [16; 17; 20; 21].

Отобранный образец пробы масла объемом не более 25 мл прокачивается через мембранный фильтр «Владипор» с толщиной фильтрации 0,9 - 1,1 мкм для осаждения на нем металлической примеси. Фильтр устанавливается в кювету рентгенофлуоресцентного анализатора, облучается и измеряется интенсивность флуоресценции. Далее с помощью метода внешнего стандарта вычисляется массовая доля.

Погрешность результатов рентгеноспектральных измерений массовой доли определяется несколькими факторами. Установлено, что на интенсивность флуоресценции влияют размер, форма и ориентация частицы на поверхности фильтра [22; 23]. Так, в случае выделения на фильтр осадка отработанного авиационного масла при пропускании объема 25 мл, содержащего $15 \cdot 10^{-4}$ меди, на фильтре площадью 1 см^2 формируется слой, толщина которого в предположении его однородности оказывается около 0,5 мкм. Указанная величина существенно меньше критерия «тонкого» слоя, для которого влиянием поглощающих свойств анализируемого материала на интенсивность рентгеновской флуоресценции можно пренебречь. Однако на самом деле размер частиц в отфильтрованном осадке отработанных масел варьируется от единиц до десятков микрон. Поэтому вместо тонкого однородного слоя на фильтре формируется слой в одно зерно со значительной скважностью между зернами. Интенсивность рентгеновской флуоресценции такого неоднородного образца может существенно отличаться от интенсивности той же навески, распределенной на поверхности фильтра в стандартном образце виде тонкого однородного слоя и сказываться на измерении величины массовой доли [24; 25].

Кроме того, специфика подготовки пробы к анализу при рентгенофлуоресцентных измерениях также сказывается на правильности измерения массовой доли. При осаждении пробы на мембранный фильтр часть частиц уходит в слив. При этом массовая доля таких частиц может быть существенной (см. табл.1).

В таблице 1 приведены результаты атомно-эмиссионных и рентгенофлуоресцентных измерений содержания меди в пробах масла, отобранных при отработке двигателя ТВ7-117 на стенде в процессе циклических испытаний [26].

Таблица 1 – Результаты измерений содержания меди в пробе масла БЗ-В, слитого с двигателя ТВ7-117 [26].

| | Атомно-эмиссионная аппаратура | | | Рентгено-флуоресцентная аппаратура | | |
|---------|-------------------------------|-----------|--------|------------------------------------|--------|-------------|
| | МОА | SpectrOil | МФС-5 | БАРС-ЗДА | ПРИЗМА | SpectroScan |
| № пробы | С, ppm | С, ppm | С, ppm | С, ppm | С, ppm | С, ppm |
| 1 | 27,92 | 18,70 | 5,80 | 0,46 | 0,36 | - |
| 2 | 28,43 | 17,23 | 5,50 | 0,64 | 0,38 | - |
| 3 | 28,28 | 16,67 | - | 0,59 | 0,00 | 0,35 |
| 4 | 28,58 | 19,23 | - | 0,49 | 0,00 | - |
| 5 | 26,00 | 14,17 | - | 0,36 | 0,00 | - |
| 6 | 26,30 | 18,07 | 6,00 | 0,24 | 0,00 | 0,13 |
| 7 | 25,97 | 16,30 | - | 0,04 | 0,00 | - |

Видно, что атомно-эмиссионные спектрометры показывают значительные содержания меди в пробах, в то время как рентгенофлуоресцентные анализаторы — результаты, близкие к нулевым. Такие результаты объясняются особенностью подготовки проб к анализу и особенностью протекания износных процессов в двигателе. Вероятнее всего, износные процессы, протекающие в двигателе, сопровождались генерацией частиц изнашивания малого размера (предположительно доли, единицы мкм). Понятно, что при таком типе изнашивания большая часть частиц при пробоподготовке ушла в слив, на поверхности фильтра частицы фактически отсутствовали и рентгенофлуоресцентные измерения показали результаты близкие к нулевым.

Очевидно, что высокая правильность определения массовой доли может быть достигнута в случаях, когда используемое оборудование позволяет проводить измерения во всем возможном диапазоне изменения функции распределения частиц изнашивания по размерам. В случае отсутствия такой аппаратуры необходимо комплексное применение различных методов трибодиагностирования [27; 28].

Дополнительно, общим ограничением рассмотренных методов является недостаточное количество информации о частицах изнашивания - измеряется всего один параметр (массовая доля) [29; 30].

Решение о допуске двигателя в эксплуатацию после ПСИ принимается по величине измеренной массовой доли. Учитывая влияния и ограниченную информацию о параметрах частиц изнашивания при атомно-эмиссионных и рентгеноспектральных измерениях велика вероятность принятия недостоверного диагностического решения и отправке в эксплуатацию двигателя с начальными признаками повреждения.

Предпринимались попытки ввести дополнительный диагностический признак при использовании рентгенофлуоресцентного контроля состояния двигателя – влияние неоднородности осадков отработанного масла [31]. Показано, что величина неоднородности, связанная с появлением в пробе крупных частиц, может служить одним из критериев оценки технического состояния двигателя. Сведения по дальнейшему развитию данного направления отсутствуют.

1.3. Микрорентгеноспектральный метод измерения параметров частиц

В микрорентгеноспектральном анализе рентгеновское излучение в исследуемом образце возбуждают электронным пучком. Для идентификации элементов, содержащихся в образце, и определения их концентрации 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 [32; 33].

Микрорентгеноспектральный метод анализа, в принципиальном плане, является единственным методом, позволяющим получить полную, высокоточную информацию о параметрах частиц изнашивания, которая включает размер, форму частиц, их количество и элементный состав каждой

частицы. При этом, метод позволяет определять большую часть элементов периодической таблицы, начиная с четвертого номера.



Рисунок 1.3 – Микрорентгеноспектральный анализатор JXA-8200

Формирование электронного пучка в узконаправленный зонд диаметром 1 мкм позволяет определять элементный состав каждой металлической частицы в исследуемой области. Для качественного анализа необходимо зарегистрировать в рентгеновском спектрометре линии анализируемых элементов. Для идентификации линий используют таблицы Уайта и Джонса. Количественный анализ основан на измерении отношения интенсивностей рентгеновских линий, испускаемых образцом и эталоном известного состава [34].

Благодаря уникальной системе регистрации, основанной на детектировании отраженных электронов, метод позволяет получать изображение поверхности при большом увеличении (рис. 1.4), что позволяет определять форму и размер частиц изнашивания.

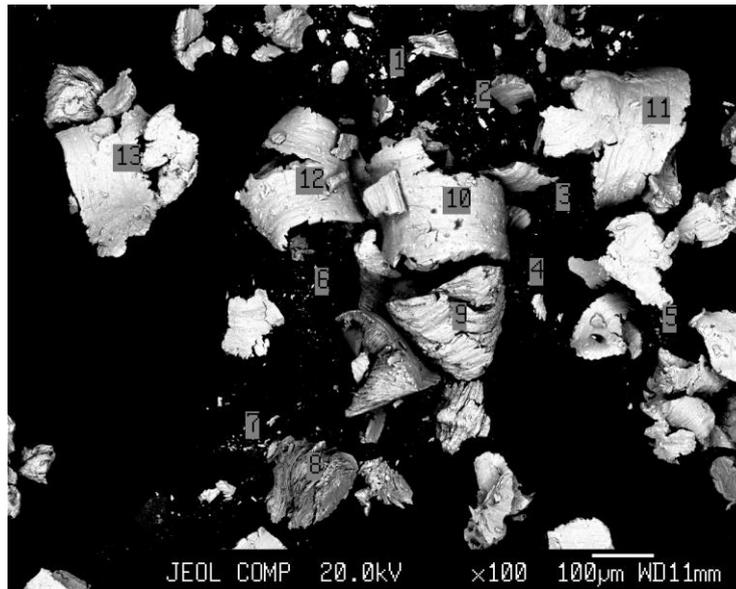


Рисунок 1.4 – Снимок области подложки с частицами изнашивания при увеличении в 100 раз

С другой стороны, сложная пробоподготовка, длительность анализа (в среднем на измерение параметров 500-600 частиц в одной пробе необходимо 40-50 часов работы оператора), аппаратура, требующая квалифицированного оператора, высокая стоимость анализа одной пробы ограничивают применение метода в условиях эксплуатации.

В настоящее время микрорентгеноспектральный метод анализа применяется для определения элементного состава стружки, обнаруженной на основном маслофилт্রে в двигателях компании Rolls-Royce [35].

В данной работе электронно-зондовый микроанализатор JXA-8200, представленный на рисунке 1.3 использовался для верификации результатов, полученных на СВЧ плазменном анализаторе.

1.4. СВЧ плазменный метод анализа частиц изнашивания

В НИИ прикладной физики ИГУ разработан атомно-эмиссионный сцинтилляционный (СВЧ плазменный) метод анализа, позволяющий измерять параметры частиц изнашивания, как в пробах масла, так и в пробах смыва с маслофильтра (фильтроэлемента). Внешний вид анализатора представлен на рисунке 1.5.

Использование СВЧ плазменного анализатора для оценки технического состояния узлов маслосистемы ГТД позволило эмпирически выявить новые эффективные диагностические признаки в пробе смыва с маслофильтра, позволяющие в отдельных случаях выявлять поврежденный узел и оценивать техническое состояние двигателя с достоверностью до 90% [9; 36], против 7% при использовании традиционных методов контроля (атомно-эмиссионный и рентгенофлуоресцентный методы) [37].



Рисунок 1.5 – СВЧ плазменный анализатор САМ-ДТ-01-2

СВЧ плазменный анализатор по способу введения пробы масла в источник возбуждения спектров, способу выделения и регистрации

аналитического сигнала принципиально отличается от рассмотренных выше методов. Ниже описывается принцип работы СВЧ плазменного анализатора, выявленные в эксплуатации ограничения и возможные пути их устранения.

1.4.1. Блок-схема СВЧ плазменного анализатора и измеряемые параметры при анализе пробы масла.

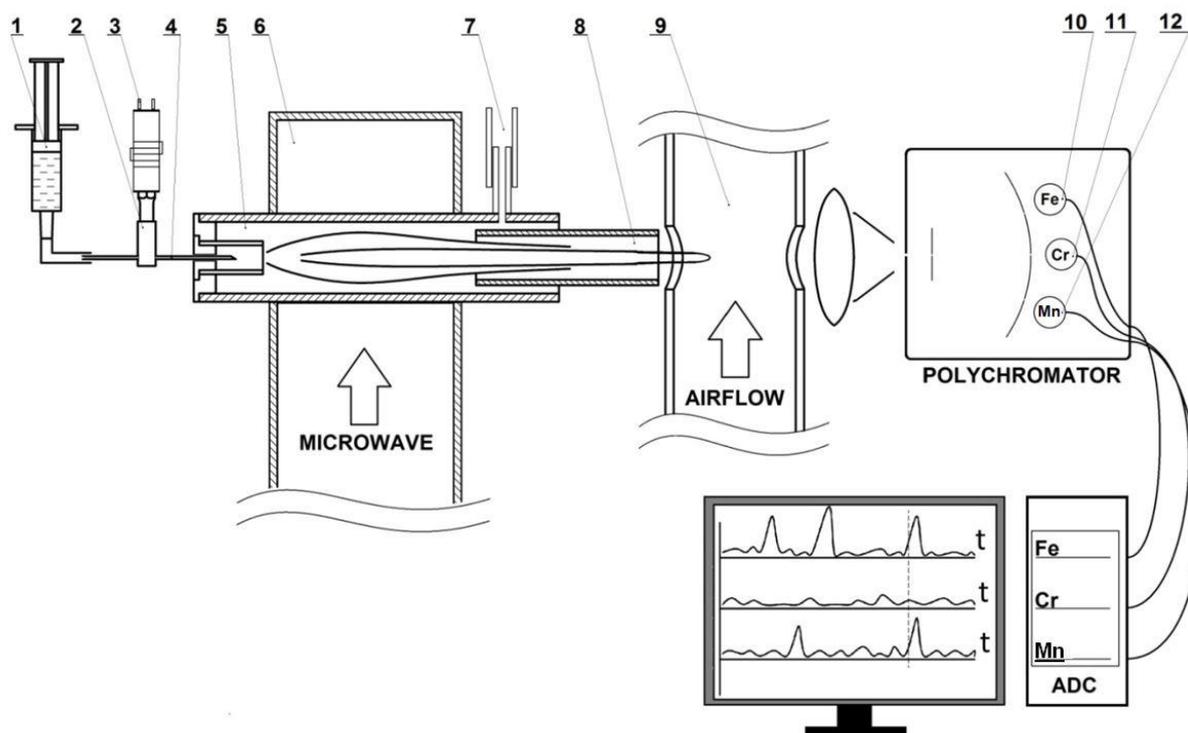
Метод СВЧ-плазменного анализа основан на непрерывном введении аэрозоля пробы масла, распыляемой ультразвуковым распылителем в спектральный источник света и регистрации возникающих вспышек - сцинтилляций аналитических линий химических элементов от каждой, встретившейся в пробе и попавшей в аналитическую зону источника, металлической частицы [38–44].

Благодаря высокой концентрации паров элемента, возникающей в момент попадания частицы в аналитическую зону источника, полезный спектральный сигнал, имеющий форму импульса, значительно превышает уровень шумов и регистрируется с высокой надежностью. Это обстоятельство обеспечивает достижение низких значений относительного предела обнаружения ($n \cdot 10^{-6} \div n \cdot 10^{-7} \%$) по сравнению с другими “прямыми ” (т.е. без предварительного обогащения пробы) методами анализа, основанными на регистрации интегрального сигнала за экспозицию [11].

Одновременно с импульсами, возникающими от отдельных микронных частиц, сцинтилляционный анализатор дополнительно регистрирует и измеряет равновесный сигнал, возникающий от растворенного в масле металла и субмикронных частиц, импульсы от которых незначительно превышают уровень фона «чистой» плазмы. Естественно, что предел обнаружения этой формы примеси значительно выше, чем при СВЧ плазменных измерениях содержания примеси, находящейся в форме микронных частиц, и составляет

($n \cdot 10^{-3} \div n \cdot 10^{-4} \%$), как и при обычных в спектральном анализе интегральных измерениях.

Принцип получения информации о параметрах металлических частиц при анализе проб масел заключается в следующем (рис. 1.6). Предварительно отобранная и подготовленная в ультразвуковой ванне для анализа проба масла объемом 1 миллилитр отбирается в одноразовый шприц-дозатор (1), из которого с помощью привода от шагового двигателя масло равномерно подается через капилляр в ультразвуковой распылитель (2) со скоростью 100 мкл/мин. Поток транспортирующего газа (3) с расходом 0,2 л/мин аэрозоль непрерывно, в течение 10 минут, вводится в источник возбуждения спектров – воздушную плазму газового разряда СВЧ-плазмотрона циклонного типа (5). Температура воздушной плазмы составляет 5200 К. Преимуществом использования в качестве плазмообразующего газа воздуха против аргона и азота является удобство и дешевизна его использования, а главное, за счет избытка кислорода способствовать выгоранию масла в струе плазмы.



1 – шприц-дозатор; 2 – распылитель; 3 – разъем подачи транспортирующего газа; 4 – распыляющий капилляр; 5 – плазменная горелка; 6 – волновод

(резонатор); 7 – разъем подачи плазмообразующего газа; 8 – выхлопная труба плазменной горелки; 9 – система удаления продуктов горения; 10 - 12 – фотоумножители; 13 – компьютер.

Рисунок 1.6 – Блок-схема СВЧ плазменного анализатора

СВЧ излучение, подаваемое по волноводу (6), поддерживает СВЧ-разряд атмосферного давления в разрядной камере, изготовленной из кварцевого стекла. Продукты сгорания масла и металлического пара выбрасываются через выходное сопло плазмотрона и отводятся наружу с помощью плазмотбойника (9).

При попадании в плазму капли масла сгорают, а металлические частицы мгновенно нагреваются и испаряются. Полученный атомный пар возбуждается, т.е. происходит вспышка излучения (сцинтилляция) от каждой испарившейся частицы. Скорость поступления анализируемой пробы выбрана такой, чтобы металлические частицы микропримеси поступали в плазму последовательно по одной.

Излучение атомного пара с помощью конденсора направляется в спектральный прибор — полихроматор. Разложенное в спектр излучение регистрируется фотоумножителями (10-12).

Длительность импульса излучения частицы пропорциональна времени нахождения ее в плазме и может составлять от 1 мс до 10 мс. Поэтому на выходе фотоумножителей образуется последовательность импульсов различных длительностей и амплитуд. Электрические импульсы с фотоумножителей поступают на преобразователь ток-напряжение и далее обрабатываются аналого-цифровым преобразователем (13). Информация по каждой анализируемой пробе обрабатывается ПЭВМ и записывается в базу данных.

В случае одновременного присутствия в пробе растворенного металла и металла в виде износных частиц на выходе фотоумножителей присутствует

непрерывный (фоновый) сигнал, соответствующий растворенному металлу и импульсный - соответствующий износным частицам.

По специальным градуировочным графикам импульсный сигнал пересчитывается в элементное содержание износных частиц, непрерывный – в содержание растворенного элемента. Число вспышек (зарегистрированных импульсов) равно числу износных частиц прошедших горячую зону плазмы.

На рисунке 1.7 показано только три канала выделения сигнала, число их зависит от типа полихроматора и может быть увеличено. Каждый канал настроен на регистрацию аналитической линии заданного элемента.

При попадании в плазму частиц, состоящих, например, только из железа, последовательность импульсов излучения будет присутствовать на канале Fe (рис. 1.7 а) На каналах Cr и Mn наблюдается непрерывное, слабое фоновое излучение плазмы.

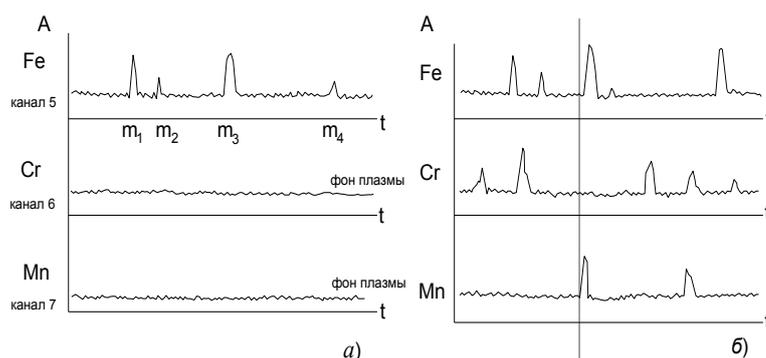


Рисунок 1.7 – Пример регистрации импульсного сигнала: а) – последовательность импульсов излучения, при присутствии в пробе только одного элемента; б) – последовательность импульсов излучения при одновременном присутствии в пробе трех элементов

В случае если в масле присутствуют одновременно «сложные» частицы металла, состоящие из нескольких элементов (например, легированная сталь Fe-Mn) и простые, где каждая частица представлена одним элементом, то ПЭВМ сортирует импульсы излучения по одновременности их появления.

Совпадение по времени двух и более импульсов излучения указывает на наличие «сложной» частицы и, соответственно, на ее состав и тип сплава. На

диаграмме (рис. 1.7 б) представлены, в качестве примера, совпадающие импульсы по каналам Fe и Mn. В данном случае совпадающие импульсы показывают, что в пробе присутствовала «сложная» частица Fe-Mn.

Таким образом, при использовании аналитической навески в 1 мл анализатор за время 10 минут одновременно по 8 элементам (Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V) выдает следующую информацию:

- [Сч, г/т] – содержание элемента в частицах, находящегося в масле в виде частиц изнашивания (размер частиц более 2 мкм);
- [Ср, г/т] – содержание элемента растворенном виде, растворенного в масле и содержащегося в виде субмикронных частиц (размер частиц менее 2 мкм);
- [С, г/т] – содержание элемента, которое выражается как сумма Сч.+Ср.= С;
- [Nпр, 1/см³] – число «простых» частиц, состоящих только из одного элемента;
- [Nсл, 1/см³] – число «сложных» частиц, состоящих из двух и более элементов;
- [N, 1/см³] – общее число частиц износа;
- [D, мкм] – средний размер частиц данного элемента;
- элементный состав каждой износной частицы;
- количество составов «сложных» частиц.

1.4.2. Диагностические параметры при анализе пробы смыва с маслофильтра

Определение большого количества параметров частиц изнашивания кардинально не решило проблему достоверности диагностирования по результатам анализа пробы масла.

Выше отмечалось, что по результатам рентгенофлуоресцентных измерений и результатам атомной эмиссии практически не выявлялись неисправности узлов трансмиссионной части двигателей. Привлечение дополнительных методов (феррография, микрорентгеноспектральный метод, различные счетчики частиц и т.д.) для увеличения числа измеряемых параметров при анализе пробы масла не улучшило достоверности диагностирования [28; 35–37; 46]. Очевидно, что в таких случаях проба масла не несет достаточной информации об износных процессах в двигателе.

Была предпринята попытка поиска новых источников диагностической информации. В качестве источника диагностической информации о техническом состоянии авиадвигателя начали использовать пробу смыва с маслофильтра [47; 48].

При оценке технического состояния системы смазки авиадвигателя, по результатам анализа пробы масла, отсутствует проблема в выборе диагностических параметров. В качестве таких параметров могут быть использованы абсолютные значения содержания металла и количество частиц изнашивания [4; 21; 29; 46].

Использование абсолютных параметров для пробы смыва с маслофильтра в реальной практике практически не применимо, поскольку они зависят от большого числа факторов, которые невозможно учесть – времени наработки фильтра, типа двигателя, полноту извлечения частиц с маслофильтра и т. д.

При разработке технологии диагностирования было выявлено, что в исправном двигателе в пробе масла и пробе смыва всегда в больших количествах присутствуют одноэлементные, «простые» частицы [44]. По мере работы детали и агрегаты изнашиваются, и в анализируемых пробах увеличивалось количество частиц, состоящих из двух и более элементов, «сложных» частиц.

В качестве одного из основных диагностических признаков использовалось [Вобщ.] – отношение общего количества «сложных» частиц к

общему количеству «простых» частиц. Чем больше это отношение, тем хуже состояние двигателя [44].

Используя параметр $[V_{\text{элемент}}]$ – отношение общего количества «сложных» частиц к количеству «простых» частиц для определенного элемента, можно определить элемент, ответственный за повышение $[V_{\text{общ.}}]$, и тем самым обратить внимание на сложные частицы, содержащие этот элемент, что, в конечном счете, позволяет более точно определить агрегат двигателя, подверженный износу.

Кроме того, были найдены дополнительные параметры, коррелирующие с техническим состоянием авиадвигателя:

$[Ro]$ – доля количества частиц изнашивания, содержащих определённый элемент, в общем количестве частиц изнашивания (вклад частиц изнашивания по элементам);

$[R_{\text{пр.}}]$ – доля количества «простых» частиц изнашивания определённого состава в общем количестве частиц изнашивания (доля «простых» частиц изнашивания по элементам);

$[R_{\text{сл.}}]$ – 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.);

$[RG]$ – количество различных составов «сложных» частиц.

Доля частиц изнашивания рассчитывалась как количество частиц определённого сорта, приходящихся на 1000 общих частиц. Тем самым устранялось влияние времени накопления частиц на фильтре, степени разбавления пробы [48].

Использование в эксплуатации СВЧ плазменного метода для оценки состояния двигателей по результатам анализа проб, слитых с коробок приводов и пробы смыва с маслофильтра в качестве источников диагностической информации позволило достигнуть следующих результатов. Так, за счет измерения и учета величины параметров частиц изнашивания в пробе масла и смыве с маслофильтра, достигнута достоверность принятия диагностического

решения в 90% с точностью до узла [43; 44]. При этом была решена одна из главных проблем – установлены корреляционные связи между измеряемыми относительными параметрами частиц износа в пробе смыва с маслофильтра и техническим состоянием двигателя.

Сравнение диагностических возможностей СВЧ плазменного метода с используемыми спектральными методами в авиационной отрасли в настоящее время указывают на перспективность первого и возможность его использования при проведении ПСИ.

С другой стороны, поскольку отсутствуют сведения о параметрах частиц изнашивания в двигателях после ПСИ, то для использования в качестве контрольного СВЧ плазменного метода необходимо проведение следующих исследований:

1. теоретически и экспериментально оценить влияние размеров металлических частиц на выходной импульсный сигнал при измерении массовой доли элементов;
2. получить экспериментальные данные по испаряемости металлических частиц изнашивания микронных размера в СВЧ плазме;
3. оценить достоверность определения элементного состава частиц изнашивания при СВЧ плазменных измерениях. Верифицировать полученные данные с помощью независимого метода;

1.4.3. Метрологическое обеспечение методов контроля технического состояния узлов трения авиационных ГТД по параметрам частиц изнашивания

При оценке технического состояния узлов и агрегатов, авиационных ГТД омываемых смазочным маслом, спектральными методами, обязательным является метрологическое обеспечение средств диагностирования авиационных ГТД [49; 50].

В разделах 1.1, 1.2 отмечалось, что наибольшее распространение получили спектральные методы анализа - рентгеноспектральный и атомно-эмиссионный. Рассмотрим метрологическое обеспечение для БАРС-3 и спектрометров семейства МФС.

Для оценки метрологических характеристик обоих типов приборов используются стандартные образцы СОП 1-009...СОП1-13. В качестве имитаторов частиц изнашивания используют различные оксиды и соли металлов [51–53] (см. табл. 2)

Таблица 2 – Вещества, используемые в качестве имитаторов частиц изнашивания.

| Химическая формула | Наименование вещества | Чистота | Номенклатурный номер |
|--------------------|--|---------|----------------------|
| Fe_2O_3 | железо (III) окись | ОСЧ | ТУ6-09-1418-78 |
| CuO | медь (II) окись, порошок для спектрального анализа | ЧДА | ТУ6-09-3078-77 |
| Al_2O_3 | окись для спектрального анализа | ХЧ | ТУ6-09-973-76 |
| MgO | окись для спектрального анализа | ЧДА | ТУ6-09-01-245-74 |
| Ni_2O_3 | никель окись черная | ОСЧ | ТУ6-09-3641-74 |
| Cr_2O_3 | хром (III) окись | ЧДА | ТУ6-09-4272-84 |
| TiO_2 | титан окись (брукит) | ЧДА | - |
| Ag_2SO_4 | серебро сернокислое | ХЧ | ТУ6-09-3703-74 |

При подготовке оксидов металлов их тщательно перетирают в течение 3 часов в агатовой ступке, что обеспечивает дисперсность частиц не более 5–6 мкм. Затем из готового гомогенизированного порошка готовится СОП в соответствии с методическими указаниями.

После приготовления СОП проводят их аттестацию, для чего каждый полученный образец измеряют минимум три раза на анализаторе в соответствии с действующей методикой выполнения измерений. Полученные результаты измерений статистически обрабатывают, в том числе проводят оценку значимости различия средних арифметических групп результатов

наблюдений, другими словами проводят оценку полученных результатов на наличие грубых выбросов, по формуле:

$$\alpha_{\text{изм}} = \left| \frac{\bar{A} - A_j}{\bar{A}} \right| * 100\% \leq \alpha_{\text{доп.}} \quad (1.1)$$

где, \bar{A} – среднее арифметическое результатов наблюдений;

A_j – единичный результат наблюдений;

$\alpha_{\text{изм}}$ – коэффициент отклонения.

Для результатов полученных на анализаторе БАРС-3, если $\alpha_{\text{изм}}$, меньше $\alpha_{\text{доп}}=15\%$ грубые результаты наблюдений в данной выборке отсутствуют и за результат измерения принимается величина \bar{A} . В противном случае грубый результат наблюдений исключают, и производят перерасчет среднего арифметического [10; 20].

Для результатов, полученных на установках типа МФС, если $\alpha_{\text{изм}}$, меньше $\alpha_{\text{доп}}=35\%$ грубые результаты наблюдений в данной выборке отсутствуют и за результат измерения принимается величина $[\bar{A}]$. В противном случае грубый результат наблюдений исключают, и производят перерасчет среднего арифметического [10].

Использование «чистых» оксидов и солей металлов для приготовления стандартных образцов, обработка результатов измерений с оценкой «грубых» выбросов позволяет метрологически сопровождать и обслуживать данные типы анализаторов. Однако такой подход может отрицательно сказываться на результатах оценки достоверности диагностировании авиадвигателя.

В работе [54] отмечается, что в работавшем масле исправного авиадвигателя размер частиц не превышает 3 мкм, в неисправных двигателях размер частиц может превышать 10 мкм. В настоящее время по результатам микрорентгеноспектрального анализа установлено, что в смазочном масле исправного авиадвигателя максимум в распределении частиц по размерам приходится на диапазон 10–20 мкм, правый «хвост» распределения может достигать значений более 100 мкм [55–57].

Таким образом, наблюдается несоответствие распределения по размерам частиц СО и распределения частиц в анализируемой пробе. Ввиду особенностей спектральных методов, применяемых в авиации, анализируется не весь диапазон размеров частиц, поступившей на анализ пробы. Каждый из названных факторов является возможной причиной диагностического промаха.

Ранее уже отмечалось, что в смазочном масле исправного авиадвигателя, в основном, присутствуют «простые» (одноэлементные) частицы. С возникновением и развитием повреждения в систему смазки двигателя начинают поступать «сложные» частицы изнашивания, состоящие из двух и более элементов [44]. Следовательно, за возникновение и развитие повреждения в авиадвигателе отвечает наличие и количество «сложных» частиц, при этом состав «сложных» частиц позволяет с определенной точностью установить конкретный узел подверженный износу [43].

Поэтому, использование оксидов и солей металлов для приготовления стандартных образцов являются еще одним фактором, ограничивающим диагностические возможности спектральных методов. Необходимы такие СО, в которых соблюдается не только соответствие с материалами, используемыми в конструкции авиадвигателя, по элементному составу, но и по форме нахождения этих элементов. Другими словами, необходимы СО на основе реальных частиц изнашивания.

Такой стандартный образец разработан ООО «Диагностические технологии» в рамках создания государственного стандартного образца [58]. Данный стандартный образец изготовлен на основе реальных частиц изнашивания, выделенных из смазочного масла двигателя. ГСО представляет собой дискретную примесь в объеме масла и в настоящее время может применяться для градуировки и метрологического сопровождения СВЧ плазменного анализатора.

1.4.4. Устройство для распыления и подачи пробы масла в плазму

Одним из ответственных узлов СВЧ-плазменного анализатора, определяющим метрологические и диагностические параметры прибора, является устройство для распыления и подачи пробы масла в источник возбуждения спектров.

В настоящее время разработаны множество конструкций распылительных устройств и освоено их серийное производство. Основными типами являются пневматические и ультразвуковые (УЗ) распылители, обеспечивающие преобразование жидкости в облако мелких аэрозольных частиц размером от единиц до нескольких десятков мкм [59–63].

Наибольшее распространение в атомно-эмиссионных и атомно-абсорбционных спектрометрах получили пневматические распылители концентрического типа [64]. Это связано, прежде всего, с их низкой стоимостью и высокой надежностью. Максимум аналитического сигнала наблюдается при расходе анализируемого раствора ≈ 2 мл/мин. При этом количество вводимой в плазму пробы не превышает 5%, остальная часть пробы уходит в дренаж (слив).

Средний диаметр капель при пневматическом распылении можно оценить с помощью эмпирического соотношения [59; 63]:

$$d = \frac{585}{u} * \frac{\sqrt{\sigma}}{\sqrt{\rho}} + 507 \left(\frac{0.1\eta}{\sqrt{\rho\sigma}} \right)^{0.45} * \left(\frac{1000\omega}{V} \right)^{1.5} \quad (1.2)$$

где: u – скорость потока газа относительно раствора, м/с;

σ – поверхностное натяжение, Н/м;

η – коэффициент вязкости раствора, Па*с;

ρ – плотность раствора, г/см³;

ω и V – расходы объемов раствора и газа в единицу времени, см³/с.

Расчеты по формуле (1.2) показывают, что для концентрических распылителей диаметр получаемых капель находится в диапазоне 10-30 мкм.

Однако выражение (1.2) не содержит каких-либо параметров, характеризующих конструкцию распылительной системы, поэтому пригодно лишь для весьма грубых оценок. Во всяком случае, из него следует, что размер капель будет возрастать с увеличением вязкости и поверхностного натяжения анализируемой жидкости и уменьшаться с ростом скорости потока распыляющего газа.

Общей проблемой в атомно-эмиссионном и атомно-абсорбционном анализе является получение капель пробы минимальных размеров. В классических способах анализа, где примесь распределена в объеме пробы равномерно, уменьшение размеров капель может быть достигнуто за счет десольватации, либо специальной конструкции распылительной камеры. При СВЧ плазменных измерениях уменьшение размеров капель за счет десольватации не приемлемо, поскольку металлическая примесь может находиться в виде отдельных частиц.

Ультразвуковые распылители обеспечивают более высокую дисперсность аэрозоля. Считается, что при ультразвуковом распылении аэрозоли почти монодисперсны. Диаметр образующихся капель можно оценить по формуле Пуазейля [61; 62]:

$$d = 0,34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.3)$$

где f – частота генератора, с-1; σ – поверхностное натяжение, Н/м;

ρ – плотность раствора, г/см³

Для успешного применения ультразвукового способа получения аэрозоля требуются генераторы, работающие в диапазоне частот 20-500 кГц и выше и обладающие мощностью, достаточной для образования тонких аэрозолей (≤ 5 мкм) при расходе раствора до 5 см³/мин.

Предел обнаружения, достигаемый с помощью УЗ-распылителей, примерно на порядок выше, чем с пневматическими, если отсутствуют значимые матричные эффекты, прежде всего, связанные с вязкостью анализируемых растворов [64]. При этом, начиная с 1990 г. применение УЗ-

распылителей в практике анализа постоянно возрастает. Опыт создания и эксплуатации СВЧ плазменного анализатора показал, что для комплексного измерения параметров частиц изнашивания требуется ультразвуковой распылитель, удовлетворяющий следующим требованиям:

1. распылитель должен формировать узконаправленный поток золя. Это связано с тем, что СВЧ плазма является температурно-неоднородным источником света диаметром 4-5 мм с максимальной температурой в центре разряда 5200 К. Температура на периферии разряда (диаметр 8-9 мм) понижается до 4200-4500 К. Поэтому поток золя должен проходить вблизи центральных участков плазмы с тем, чтобы добиться максимальных коэффициента вхождения металлических частиц в плазму и степени их проработки. Экспериментально найдено, что диаметр потока золя не должен превышать 2 мм на расстоянии 20 мм от конца распыляющей трубки;

2. при СВЧ плазменных измерениях параметров металлических частиц необходимо выполнение условия максимально полного вхождения частиц в плазму, в идеальном случае должно быть обеспечено 100% поступление частиц в высокотемпературную область СВЧ плазмы. Это требование необходимо для обеспечения аналитического сигнала от каждой металлической частицы. Ранее было установлено, что максимальный коэффициент вхождения достигается при минимальных расходах транспортирующего газа, составляющего 0,1-0,3 л/мин [65];

3. диаметр капель получаемого золя не должен превышать 40–50 микрон. Данное требование необходимо соблюдать с целью уменьшения погрешности при определении элементного состава. Так, если капля масла полученного золя имеет большой диаметр (превышает размер частицы изнашивания в несколько раз), то она может содержать в себе несколько частиц изнашивания. При попадании в плазму и испарении сигнал от такой капли может зарегистрироваться как от «сложной» частицы, что приведет к погрешности в результатах идентификации элементного состава. С другой стороны, если капля полученного золя имеет большой диаметр и в ней

содержится только одна частица изнашивания, то попадая в плазму, такая капля за счет масляной паровой рубашки будет препятствовать испарению частицы изнашивания и на выходе полезный сигнал может отсутствовать. Поскольку в исправном двигателе ширина распределения частиц изнашивания по размерам может достигать до 100 мкм, а максимум распределения приходится на 20–50 мкм, то очевидно, что максимум распределения капель масла по размерам, не должен превышать так же 40-50 микрометров. То есть, частицы металла должны поступать в плазму без масляной рубашки;

4. должна быть обеспечена стабильность работы распылителя – получение потока золя без разрывов и пульсаций. В случае возникновения пульсаций золь пробы подается в плазму порциями. Это может привести к тому, что во время выброса очередной порции золя, в плазму попадает одновременно несколько «простых» (одноэлементных) частиц и аналитический сигнал, полученный от них, может быть зарегистрирован как от одной «сложной» (многоэлементной) частицы. Кроме того, пульсации потока золя приводят к изменению фона, и в случае большого превышения фон может быть зарегистрирован как сигнал от растворенной металлической примеси в масле. В целом, возникновение пульсаций потока золя может приводить к погрешностям в результатах идентификации элементного состава, в результатах определения содержания металлической примеси как в виде частиц, так и в виде растворенной в масле металлической примеси.

Анализ литературных источников [59–64] показал, что ни одна из известных конструкций пневматических и ультразвуковых распылителей не удовлетворяет требованиям при проведении СВЧ плазменного анализа.

Нами предприняты самостоятельные попытки и в содружестве с фирмами, занимающимися разработкой УЗ распылителей (безуспешно было привлечено более 10 фирм), создать распылитель, отвечающий поставленным выше требованиям. Был разработан ряд новых конструкций, защищенных патентами на изобретение [66–71] и удовлетворяющих поставленным требованиям. Однако, все созданные новые распылители обладали

принципиальным недостатком-низкая наработка на отказ. Разработанные конструкции выходили из строя через непредсказуемо малые промежутки времени (от нескольких минут до нескольких десятков часов, происходил обрыв, деформация распыляющего капилляра) (рис. 1.7).

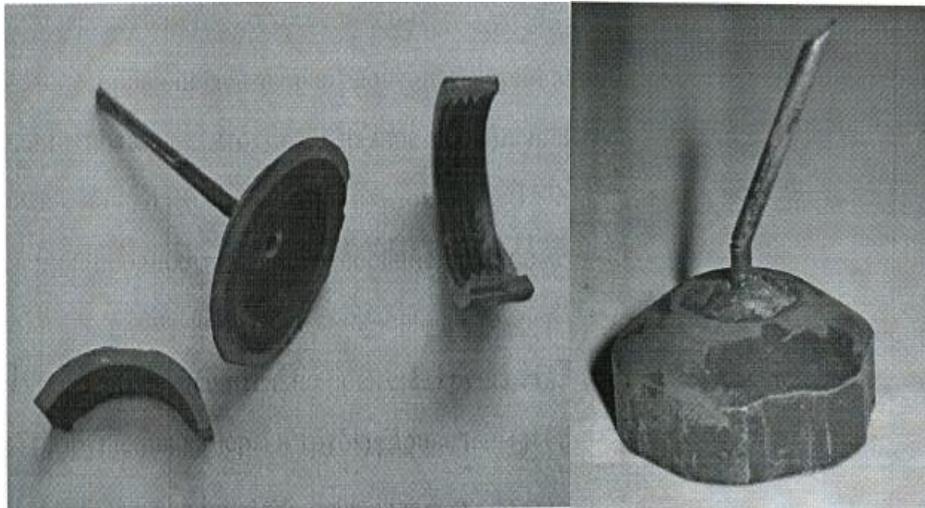


Рисунок 1.8 – Разрушение распылительной камеры и обрыв распыляющего капилляра.

На рисунке 1.8 приведена конструкция, разработанная совместно с Бийским технологическим институтом [67], которая оказалась также далека от совершенства.

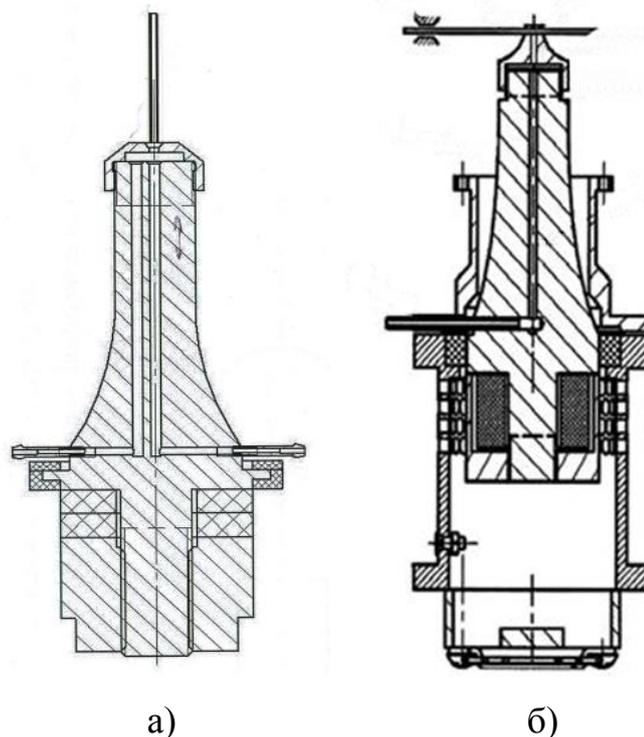


Рисунок 1.8 – Разрез ультразвуковой колебательной системы для распыления:
а) – с продольными изгибными колебаниями распыляющего капилляра; б) – с поперечными изгибными колебаниями распыляющего капилляра.

Таким образом, ставилась задача разработки новой конструкции УЗ распылителя с наработкой на отказ не менее 2 500 часов. Такая наработка сравнима с наработкой на отказ СВЧ генератора плазмы.

1.5. Выводы по главе

Краткий обзор состояния проблемы методов оценки технического состояния двигателей по результатам измерений параметров частиц спектральными методами показал следующее:

1. применяемые в авиационной отрасли диагностические методы (атомно-эмиссионный и рентгенофлуоресцентный) подвержены значительным влияниям при измерении величины массовой доли в пробе масла. Основными влияющими факторами при рентгенофлуоресцентных измерениях величины массовой доли являются распределение частиц по размерам, толщина флуоресцирующего слоя, скважность и форма частиц на поверхности фильтра. Влияниям подвержены и атомно-эмиссионные измерения, связанные с формой распределения частиц по размерам, недоиспарением крупных частиц, самообращением линий при высоких содержаниях примеси и т.д. Кроме того, общим ограничением данных методов является недостаточное количество информации о частицах изнашивания - измеряется всего один параметр (массовая доля) только для железа и меди;

2. использование в эксплуатации СВЧ плазменного метода для оценки состояния двигателей по результатам анализа проб, слитых с коробок приводов и пробы смыва с маслофильтра в качестве источников диагностической информации позволило достигнуть рекордных результатов. За счет измерения и учета величины параметров частиц в пробах из разных точек отбора (передней коробки приводов (ПКП), задней коробки приводов (ЗКП) и смыве с маслофильтра) при принятии диагностического решения, была достигнута достоверность диагностирования 90% с точностью до узла [9]. При этом была решена одна из главных проблем – установлены корреляционные связи между измеряемыми относительными параметрами частиц износа в пробе смыва с маслофильтра и техническим состоянием двигателя [48];
3. СВЧ плазменный метод контроля является наиболее перспективным для использования его при проведении ПСИ. Для использования СВЧ плазменного метода в качестве контрольного необходимо проведение следующих исследований:
 - оценить достоверность определения элементного состава частиц изнашивания при СВЧ плазменных измерениях. Верифицировать полученные данные с помощью независимого метода;
 - предложить новую конструкцию распылителя и способ ввода пробы в источник возбуждения спектров СВЧ плазменного анализатора;
 - разработать статистические модели исправных эталонных двигателей после приёмосдаточных испытаний по результатам СВЧ плазменного анализа проб масел и смывов с маслофильтра;
 - разработать методику диагностирования авиационных газотурбинных двигателей, прошедших приёмосдаточные испытания.

Глава 2. Оценка влияния характеристик СВЧ плазменного источника возбуждения спектров на формирование аналитического сигнала

В главе 1 показано, что среди различных вариантов атомно-эмиссионных спектральных методов за счет высоких информационных возможностей и экспрессности выделяется СВЧ плазменный (сцинтилляционный) метод анализа. Кроме того, за счет импульсной регистрации аналитического сигнала на два - три порядка снижены пределы обнаружения элементов, по сравнению с интегральными методами регистрации [72; 73].

Несмотря на длительный период, прошедший со дня первых публикаций, метод не получил широкого распространения, поскольку результаты анализа, в лучшем случае, соответствовали полуколичественным [74–77]. Это связано, в основном, с проблемами недостаточного уровня развития теоретических и методических знаний о методе. В частности, недостаточно изученной проблемой является влияние размеров частиц на величину импульсного (сцинтилляционного) сигнала, и обратная задача – измерение размеров частиц по величине импульсного сигнала.

В работах [39; 78–80] приведены распределения импульсных сигналов по амплитудам от проб, содержащих частицы различных размеров, полученных рассевами на ситах. Из полученных результатов следует, что при увеличении размеров частиц примеси, максимум распределения импульсных сигналов всегда остается на месте в младших классах, увеличивается только ширина распределения. Полученные таким образом результаты нельзя использовать для оценки влияния ИВС (передаточной функции источника) на аналитический сигнал, необходимо иметь пробы с очень узкими распределениями частиц, приближающиеся к дельтообразным.

В работе [39] были поставлены «прямые» эксперименты, где частицы золота готовились электроискровым дроблением и размер частиц оценивался седиментационным методом. Результаты опыта показали фактическое

отсутствие зависимости между размером частиц и импульсным сигналом. Так, при изменении размеров частиц от 250 мкм до 35 мкм (изменение массы составило 370 раз) сигнал (площадь импульса) менялся в 5 раз, амплитуда в 2.5 раза.

С учетом выявленных недостатков, описанного выше эксперимента была разработана специальная технология получения индивидуальных частиц золота диаметром от 100 мкм до 40 мкм с точностью ± 2 мкм, что соответствовало интервалу масс от $10,3 \pm 0,6$ мкг до $0,66 \pm 0,1$ мкг и макеты, имитирующие частицы золота с диаметром от 40 мкм до 5 мкм с точностью ± 1 мкм, что соответствовало интервалу масс от $0,66 \pm 1$ мкг до $0,0013 \pm 0,0004$ мкг [81]. На рисунке 2.1 показаны распределения для частиц золота разных размеров по значению аналитического параметра «площадь импульса».

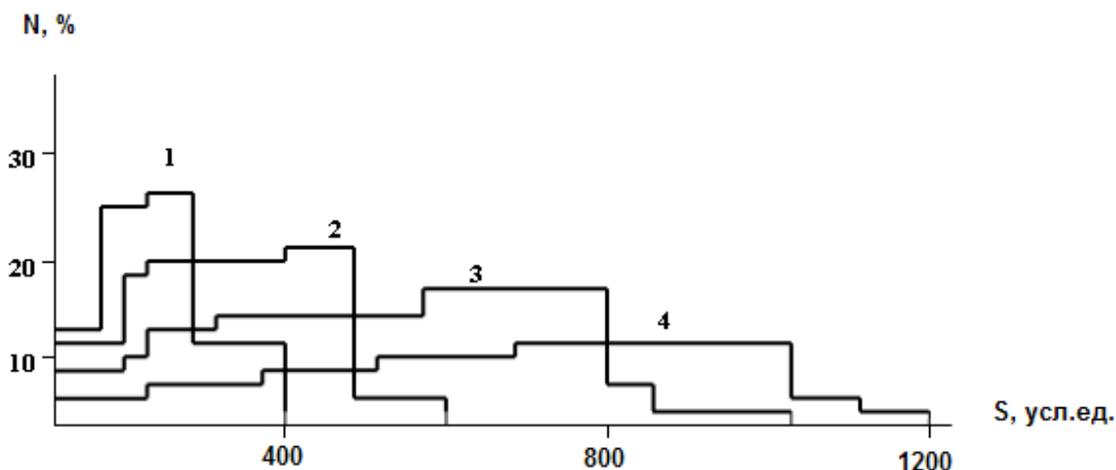


Рисунок 2.1 – Гистограммы распределения импульсных сигналов в зависимости от площади импульсов (S) и искусственных частиц различных размеров:

1) $d_{эфф.} = 6$ мкм, 2) $d_{эфф.} = 10$ мкм, 3) $d_{эфф.} = 32$ мкм, 4) $d_{эфф.} = 45$ мкм [81]

Из рисунка 2.1 видно, что распределения существенно отличаются от нормального и чем крупнее частица, тем больший диапазон рассеяния аналитического сигнала. Такой вид распределения частиц по размерам свидетельствует об отсутствии детерминированной связи между входным и выходным сигналами. Из опубликованных сообщений наиболее корректно

оценено влияние вида передаточной функции источника возбуждения спектров на аналитический сигнал в работе [82]. Данные результаты ниже использовались для моделирования вида передаточной функции источника, при котором возможно измерение размеров частиц при СВЧ плазменном способе анализа.

Цель данного раздела заключалась в теоретической и экспериментальной оценке влияния передаточной функции источника возбуждения спектров на выходные параметры распределения частиц по размерам и выработке рекомендаций по измерению размеров металлических частиц изнашивания.

2.1. Моделирование функции распределения СВЧ плазменных сигналов

Моделирование функции распределения сигналов производилось методом Монте-Карло. В качестве функции распределения частиц по диаметрам принималось логнормальное распределение, т.е. случай, когда логарифм диаметра частицы распределен по нормальному закону.

Для генерации случайных величин, имеющих заданную функцию распределения, использовался метод моделирующих функций.

Пусть α — случайная величина, распределенная равномерно в интервале $(0,1)$, тогда случайная величина $\zeta = \phi(\alpha)$, где $y = \phi(x)$ — строго монотонная и непрерывная функция на интервале $(0,1)$ распределена с плотностью вероятности $f(y) = \frac{d\phi^{-1}(y)}{dy}$, где $x = \phi^{-1}(y)$ — обратная функция. Для более общего случая справедливо следующее утверждение: пусть ζ — случайная величина распределенная с плотностью вероятности $f(x)$, тогда случайная величина $\xi^l = \phi(\xi_l)$, где $y = \phi(x)$ — строго монотонная и непрерывная функция на интервале (a, b) распределена с плотностью вероятности

$$f(y) = f(\phi^{-1}(y)) \frac{d\phi^{-1}(y)}{dy}, \quad (2.1)$$

где $x = \phi^{-1}(y)$ — обратная функция.

Справедливость этого утверждения следует из рассмотрения вероятности того, что случайная величина ζ находится в интервале $(x, x+dx)$: $dP=f(x)dx$. Производя в этом выражении замену переменных, которое справедливо в случае монотонной зависимости, получаем искомую плотность вероятности распределения случайной величины ξ^l .

Применяя это утверждение, можно, например, получить случайную величину с логнормальным распределением. Если η — случайная величина распределения по нормальному закону с параметрами (m, σ) , то случайная величина $\xi = \exp(\eta)$ распределена по логнормальному закону с плотностью вероятности

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln(y)-m)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{y}. \quad (2.2)$$

В качестве случайной величины α использовался датчик псевдослучайных чисел с равномерным распределением в интервале $(0,1)$, имеющийся в программном обеспечении современных компьютеров. Случайная величина, распределенная нормально с параметрами $(0,1)$, моделировалась с использованием известного соотношения

$$\eta^{(n)} = \sqrt{\frac{12}{n}} \sum_{i=1}^n \left(\alpha_i - \frac{1}{2}\right), n \rightarrow \infty \quad (2.3)$$

В практических расчетах удобно использовать $n = 12$, при котором моделирующее выражение принимает вид

$$\eta^{(12)} = \sum_{i=1}^{12} (\alpha_i - 6) \quad (2.4)$$

Случайная величина, распределенная нормально с параметрами (m, σ) , моделировалась с использованием очевидного соотношения

$$\zeta = m + \sigma\eta \quad (2.5)$$

Моделирование пробы, имеющей дискретно распределенную примесь, осуществлялось по следующему алгоритму. Задавались параметры пробы: S — распределения частиц по размерам: d_m и d_σ (мкм). Генерировалось N частиц со случайными размерами

$$d_i = \exp(\ln(d_m) + \ln(d_\sigma) \eta_i), i = 1, 2, \dots, N \quad (2.6)$$

где число генерируемых частиц определялось условием, что их суммарная масса равнялась массе элемента в пробе $M = C \times M_p$:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\rho}{6} \pi d_i^3 = M \quad (2.7)$$

Вследствие случайности размеров генерируемых частиц равенства в выражении (2.7) достичь не удавалось, поэтому процесс генерации частиц прекращался при условии, когда суммарная масса частиц превышала массу элемента в пробе. Это означало, что результирующая масса элемента в пробе также являлась случайной величиной.

Для каждой генерируемой частицы рассчитывалась величина сигнала

$$s_i = s_{\max}(d_i) \alpha^{1/n} \quad (2.8)$$

где $s_{\max}(d)$ — максимально возможная величина сигнала, получаемого от частицы размером d и задаваемая выражением

$$s_{\max}(d) = \begin{cases} (d_{ef}(d) / d_{\min})^k, & d_{\min} < d < d_{\max} \\ 0 & d < d_{\min}, d > d_{\max} \end{cases} \quad (2.9)$$

где $d_{ef}(d)$ — эффективный диаметр частицы, т.е. диаметр частицы с массой эквивалентной, испарившейся массе частицы

$$d_{ef}(d) = \frac{d(d_{\max} - d)}{d_{\max}} \quad (2.10)$$

Выражения (2.6) и (2.7) позволяют учитывать факт, что импульсный сигнал можно зарегистрировать только от частиц, находящихся в определенном диапазоне. При размере частиц меньше d_{\min} сигнал находится ниже уровня шумов, а при размере частиц больше, чем d_{\max} , частицы не успевают нагреться до температуры кипения и, соответственно, не возбуждают импульсный сигнал. В рабочем диапазоне размеров частиц, когда $d \ll d_{\max}$, из выражения (2.10) следует, что $d_{ef} \approx d$, т.е. частицы испаряются полностью.

Из выражения (2.9) следует, что в рабочем диапазоне изменения размеров частиц максимальный импульсный сигнал пропорционален диаметру частицы в степени k . Из работ [39; 79–80], следует, что величина k находится в диапазоне

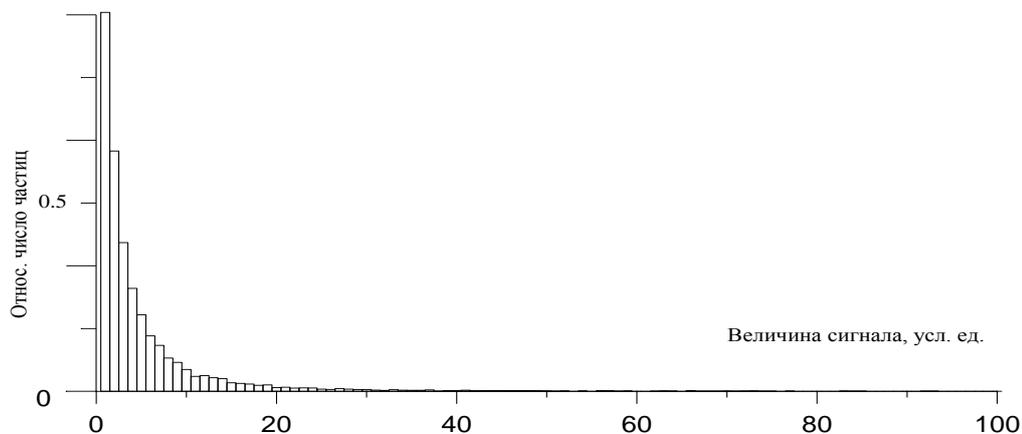
(0,6–1,5), т.е. в большинстве случаев величина импульсного сигнала (площадь, амплитуда, или длительность импульса) пропорциональна размеру частицы, а не ее массе.

2.2. Обсуждение результатов расчетов

Анализ гистограмм распределений импульсных сигналов, полученных различными авторами, позволил сделать вывод, что при любом распределении частиц по размерам в исходной пробе максимум распределения импульсных сигналов всегда находится в младших классах. Для примера, на рисунке 2.2 приведены распределения импульсных сигналов при анализе проб масел, содержащих примеси металлов различных размеров [82].

Рисунок 2.2 наглядно демонстрирует, что при увеличении размеров частиц гистограмма распределения сигналов уширяется, а максимум распределения остается в первых классах.

Моделирование распределения сигналов в зависимости от параметров распределения частиц по размерам позволило выяснить следующую закономерность.



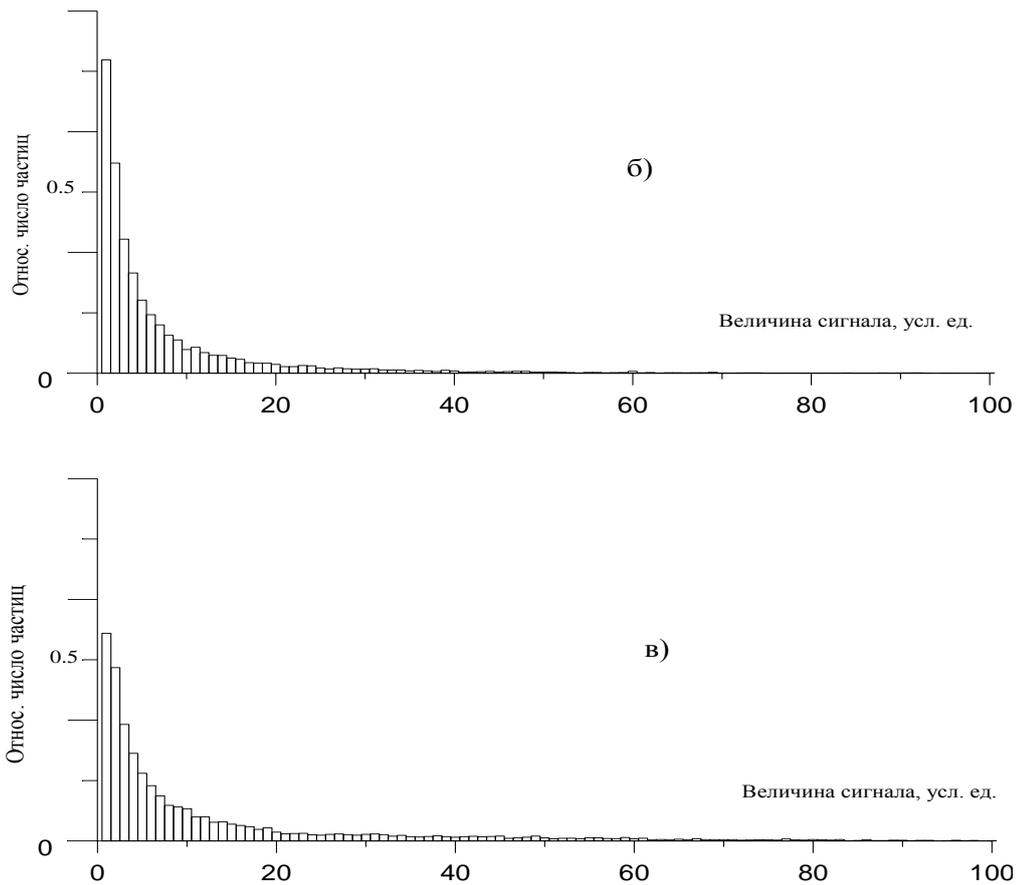


Рисунок 2.2 – Распределение сигналов от частиц металлической примеси при анализе проб масла СВЧ плазменным методом: а) – средний размер частиц 5 мкм; б) – средний размер частиц 10 мкм; в) – средний размер частиц 20 мкм.

При увеличении ширины распределения частиц по размерам максимум распределения сигналов смещался в младшие классы при одновременном увеличении ширины распределения. На рисунке 2.3 в качестве примера представлены результаты расчетов гистограмм распределения сигналов в зависимости от изменения ширины распределения частиц по размерам при значении в выражении (2.9) параметра $k = 2$.

Проведенные расчеты и сравнение с реальными гистограммами выявили противоречие. Суть его в том, что в модельных гистограммах при линейной зависимости максимального сигнала от размера частиц ($k = 1$), а также сигнала, пропорционального площади поверхности частицы ($k = 2$), всегда наблюдается максимум, тогда как в реальных гистограммах этого не наблюдается. При

величине параметра $k = 3$, т.е. когда сигнал пропорционален массе частицы, расчеты дают большой диапазон изменения сигналов, что также не наблюдается на практике. Из этого следует, что модельное представление о передаточной функции не совсем справедливо, либо при регистрации импульсных сигналов возможна регистрация ложных импульсов, которые расположены, в основном, в младших классах.

В качестве альтернативы исследовалась передаточная функция, имеющая положительную асимметрию. Моделирующей функцией являлась следующая случайная величина

$$s_i = s_{\max} (d_i) \alpha_1 \alpha_2. \quad (2.11)$$

Из теории вероятностей известно, что случайная величина $\xi = \alpha_1 \alpha_2$ распределена с плотностью вероятности $f(x) = -\ln(x)$. Таким образом, передаточная функция (2.11) имеет положительную асимметрию.

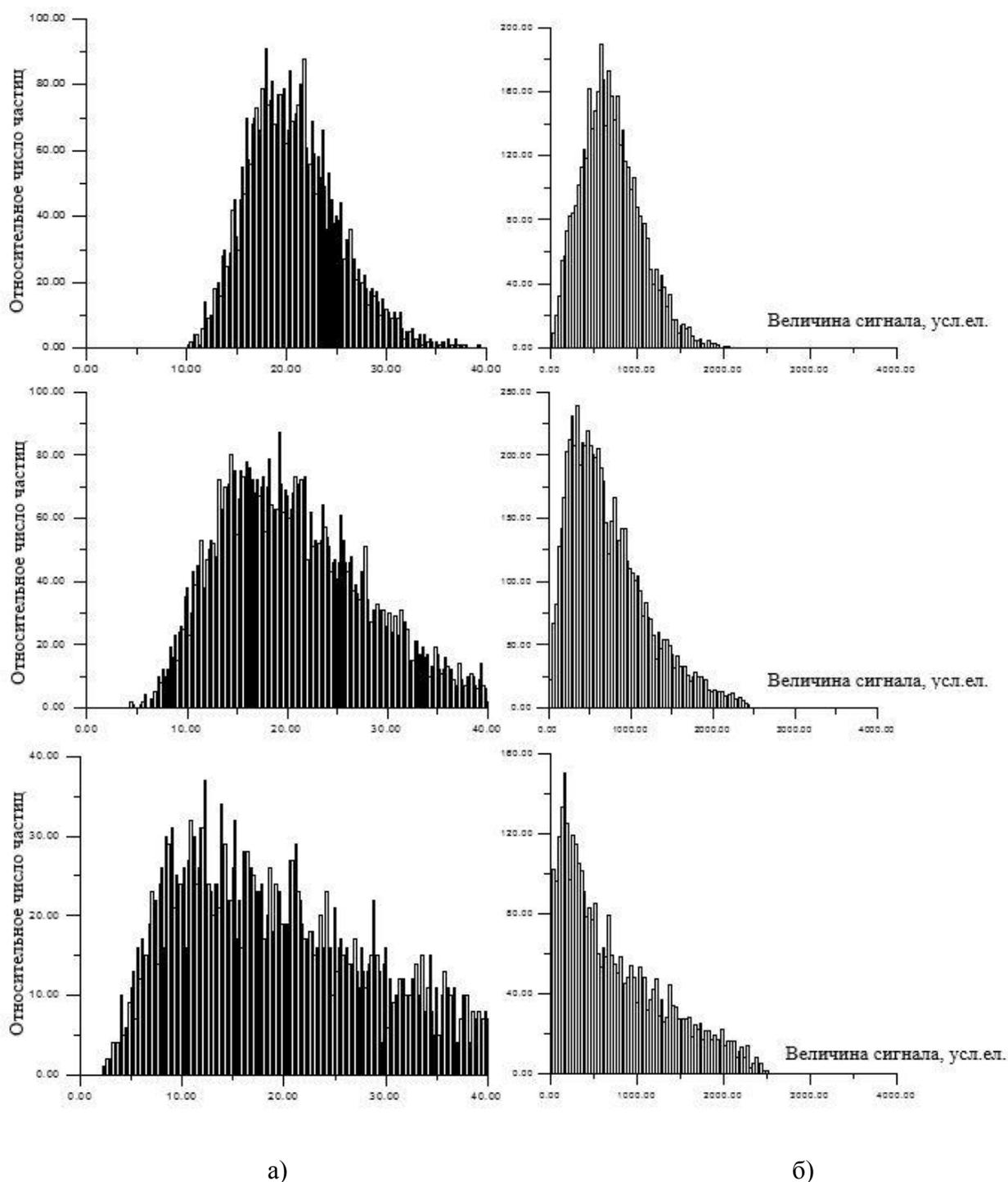


Рисунок 2.3 – Результаты расчетов гистограмм распределения сигналов в зависимости от изменения ширины распределения частиц по размерам: а) — входное распределение частиц по размерам; б) — распределение импульсных сигналов

На рисунке 2.4 представлены гистограммы распределения сигналов для трех размеров частиц 5, 10 и 20 мкм, полученные для этого случая. Из

сравнения полученных распределений, с приведенными на рисунке 2.3 видно, что они наиболее полно соответствуют друг другу.

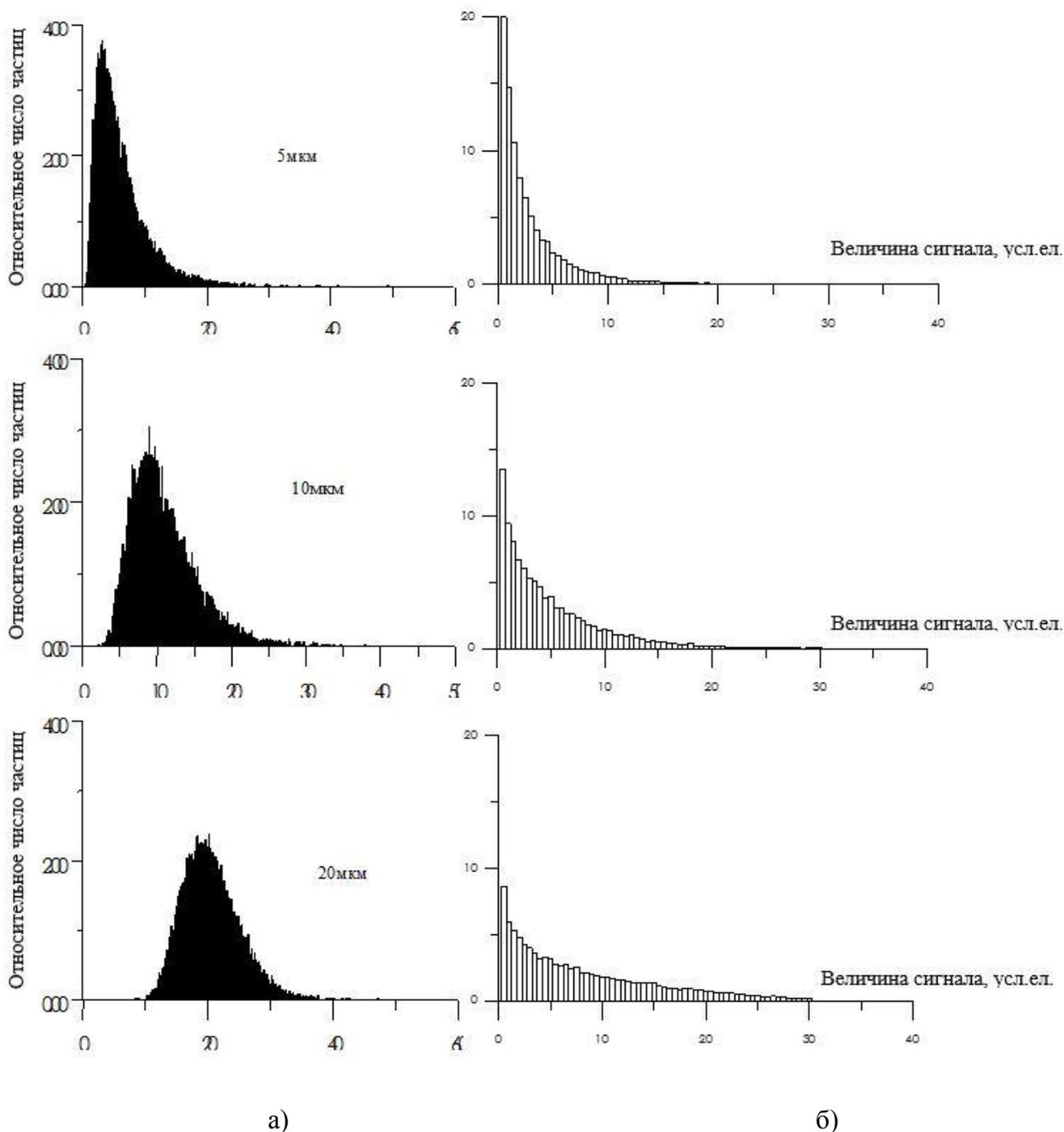


Рисунок 2.4 – Сигналы в зависимости от размеров частиц при передаточной функции, имеющей положительную асимметрию: а) – входной б) – выходной

В таблице 3 приведены результаты моделирования. Моделировалась проба, содержащая частицы меди с общим содержанием 2 г/т и разным гранулометрическим составом. Масса единичной навески составила 1 г, а число параллельных измерений 50. В качестве передаточной характеристики

источника использовалось выражение (2.8), а зависимость сигнала от размера принималась линейной $k = 1$ в выражении (2.9). Параметр $[M_k]$ – интегральная характеристика распределения сигналов, рассчитывался по формуле:

$$M_k = \sum_{i=1}^N S^k, i = 1, 2, \dots, N \quad (2.12)$$

где S – площадь импульса, выраженная в милливольтгах на миллисекунду (мВ/мс);

при $k=0$, параметр (M_0) тождественен числу зарегистрированных импульсов и, соответственно, числу сгенерированных частиц (N);

при $k=3$, параметр (M_3) пропорционален массе элемента.

Таблица 3 – Зависимость интегральной характеристики сигналов от размеров частиц определяемой примеси.

| d_m МКМ $MP = 1\Gamma$ | d_σ МКМ | $M_0 \sim (N)$ | | M_3 | |
|-----------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|
| | | ср. \bar{N} | $\sigma_{N, \text{относ.}}$ | ср. \bar{M}_3 | $\sigma_{M_3, \text{относ.}}$ |
| 5 | 0,01 | 3422 | 0 | 17 0691 | 2 050 |
| | 1 | 2947 | 29 | 17 1228 | 2 923 |
| | 2 | 2059 | 50 | 17 1052 | 3 288 |
| | 5 | 447 | 80 | 17 3515 | 31 396 |
| | 10 | 67 | 87 | 26 4199 | 17 6613 |
| 10 | 0,01 | 428 | 0 | 17 1794 | 7 238 |
| | 1 | 410 | 5 | 17 0310 | 6 223 |
| | 2 | 368 | 10 | 17 2186 | 8 236 |
| | 5 | 208 | 21 | 17 5090 | 15 682 |
| | 10 | 61 | 31 | 20 7373 | 105 071 |
| 20 | 0,01 | 54 | 0 | 17 0738 | 17 523 |
| | 1 | 53 | 1 | 17 1624 | 21 973 |
| | 2 | 52 | 2 | 17 0619 | 18 381 |
| | 5 | 43 | 5 | 17 4978 | 25 344 |
| | 10 | 29 | 7 | 18 7798 | 45 931 |

Из таблицы видно, что при увеличении d_m и d_σ значение параметра (M_0) уменьшается и увеличивается дисперсия, соответственно число генерируемых

частиц N также уменьшается и увеличивается дисперсия. Аналогичным образом ведут себя параметры (M_1) и (M_2) . В свою очередь параметр (M_3) остается инвариантным и не зависит от размеров частиц определяемой примеси. Вследствие того, что сигнал пропорционален размеру частиц, это позволяет определить среднюю массу частиц примеси и, соответственно, средний размер частиц

$$\bar{m} = \frac{M_3}{N} \quad (2.13)$$

Параметр M_k , при k выше третьего, наоборот, при увеличении d_m и d_σ начинают увеличиваться. Та же картина наблюдается для равномерной передаточной функции и передаточной функции с положительной симметрией (2.11). Это позволяет сделать вывод, что при линейной зависимости сигнала от размеров частиц инвариантом является (M_3) . Таким образом, независимо от параметров источника возбуждения спектров (вида передаточной характеристики ИВС) можно определить средний размер частиц и, соответственно, учесть его изменение.

При линейной зависимости сигнала от массы частиц инвариантом является (M_1) , т.е. суммарный аналитический сигнал. В реальной практике более эффективным оказался параметр (M_2) , (сумма квадратов площадей импульсных сигналов). При высокой неоднородности пробы, связанной с размерами частиц он менее подвержен погрешностям измерения, чем (M_3) .

2.3. Экспериментальная оценка влияния размеров металлических частиц на полноту их испарения в потоке СВЧ плазмы.

Для выполнения экспериментов были подготовлены и проанализированы пробы с частицами меди в диапазоне размеров от единиц мкм до 32 мкм. Выбор меди обусловлен тем, что данный металл является одним из основных элементов используемых в конструкции различных двигателей.

Из пластины электролитической меди электроискровым дроблением получен металлический порошок, порошок отфильтровали (просеяли) через микросита и получили набор трех фракций частиц меди. Были подготовлены фракции от единиц мкм до 5 мкм, от 5 мкм до 20 мкм, от 20 мкм до 32 мкм.

Навеску частиц фракции от единиц мкм до 5 мкм перенесли в объем 40 мл неработавшего масла МС-8П. Данный объем масла установлен экспериментальным путем кратного разбавления пробы до достижения количества регистрируемых импульсов, которое не нарушало принцип сцинтилляции – частицы должны поступать в источник возбуждения спектров последовательно по одной. Для данной фракции подобрали количество регистрируемых импульсов в количестве $8\ 000\ \text{см}^{-3}$.

Полученная проба являлась основой для построения графика концентрационной зависимости. Разбавив кратно исходную пробу в 2 и в 4 раза, построили график зависимости (M_2) от массовой доли меди для фракции частиц от единиц мкм до 5 мкм (рис. 2.5). Массовая доля меди в пробе определена с помощью атомно-абсорбционного метода.

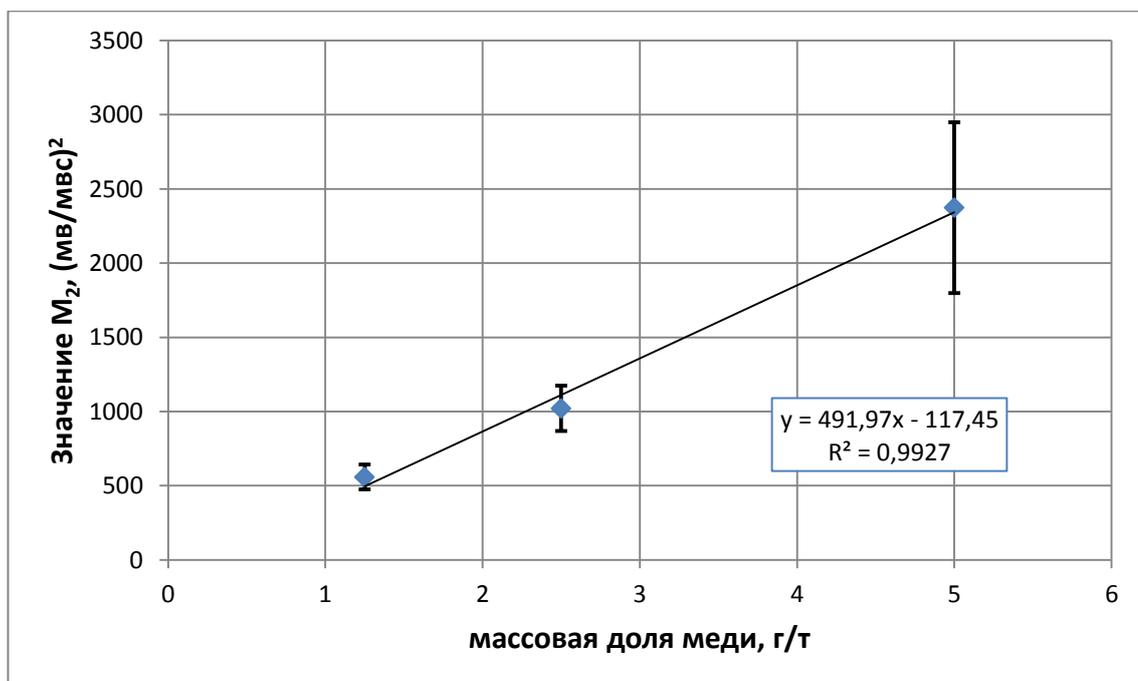


Рисунок 2.5 – Зависимость параметра (M_2) от массовой доли меди для фракции частиц размером от единиц мкм до 5 мкм

Из рисунка 2.5 видно, что значения (M_2) прямо пропорциональны изменению массовой доли меди. Коэффициент аппроксимации прямой $R^2=0,99$, что свидетельствует о полном испарении металлических частиц в плазме в данном диапазоне размеров.

Очевидно, что значения и диапазон изменения массовой доли частиц фракции от 5 мкм до 20 мкм должен соответствовать массовой доле частиц фракции от единиц мкм до 5 мкм. Однако, количество частиц и, соответственно, количество импульсов во фракции от 5 мкм до 20 мкм крайне мало, что не позволяло произвести кратное разбавление для построения концентрационной зависимости. Для решения этого вопроса эмпирическим путем была подобрана навеска на соответствующий объем масла таким образом, чтобы количество импульсов, зарегистрированных в пробе, было сопоставимо с количеством импульсов в пробе с частицами фракции от единиц мкм до 5 мкм (около восьми тысяч). Для построения концентрационной зависимости пробу «основы» кратно разбавляли в 2 и 4 раза.

Зависимость (M_2) от массовой доли меди для фракции частиц от 5 мкм до 20 мкм представлена на рисунке 2.6.

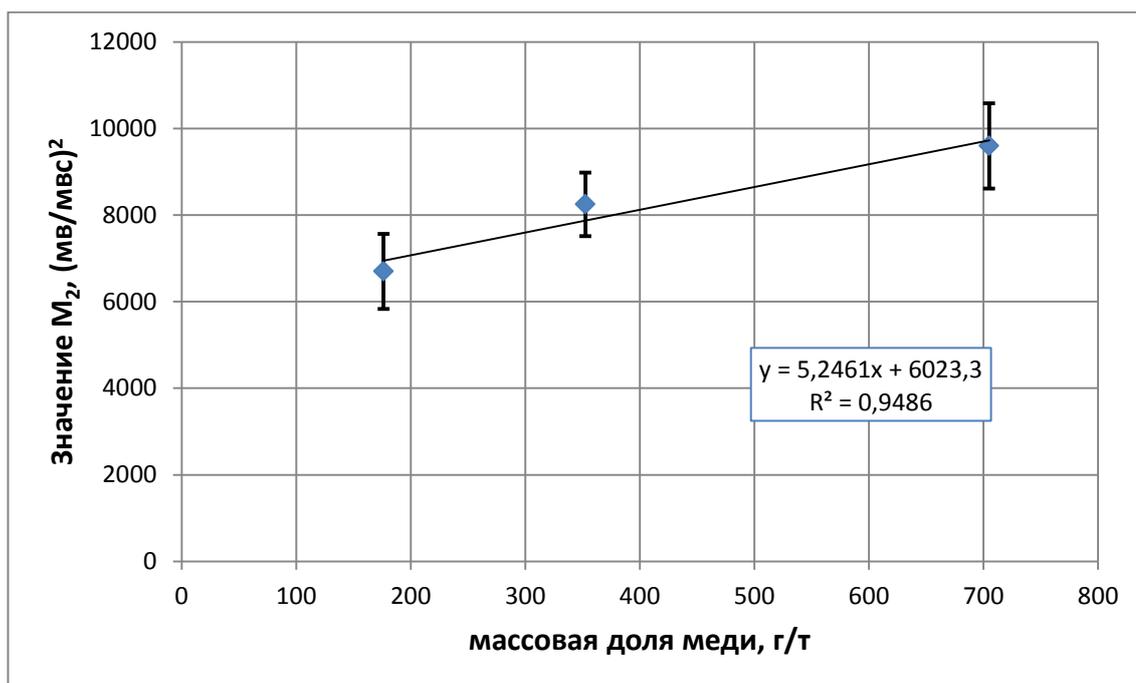


Рисунок 2.6 – Зависимость параметра (M_2) от массовой доли частиц меди для фракции от 5 мкм до 20 мкм

Из графика видно, что для фракции от 5 мкм до 20 мкм значения (M_2) увеличиваются пропорционально с увеличением массовой доли. Коэффициент аппроксимации прямой $R^2=0,95$, что также свидетельствует о достаточно высокой проработке (испаряемости) металлических частиц в плазме. Однако коэффициент аппроксимации для фракции от 5 мкм до 20 мкм ниже, чем в случае с более мелкими частицами. Данное обстоятельство может свидетельствовать о незначительном влиянии размеров частиц на величину импульсного сигнала.

Подготовка масляных проб фракции от 20 мкм до 32 мкм проводилась по аналогии с пробоподготовкой для фракции частиц от 5 мкм до 20 мкм. Для построения концентрационной зависимости пробу основы также кратно разбавляли в 2 и 4 раза. График зависимости (M_2) от массовой доли меди для фракции частиц размером от 20 мкм до 32 мкм представлена на рисунке 2.7.

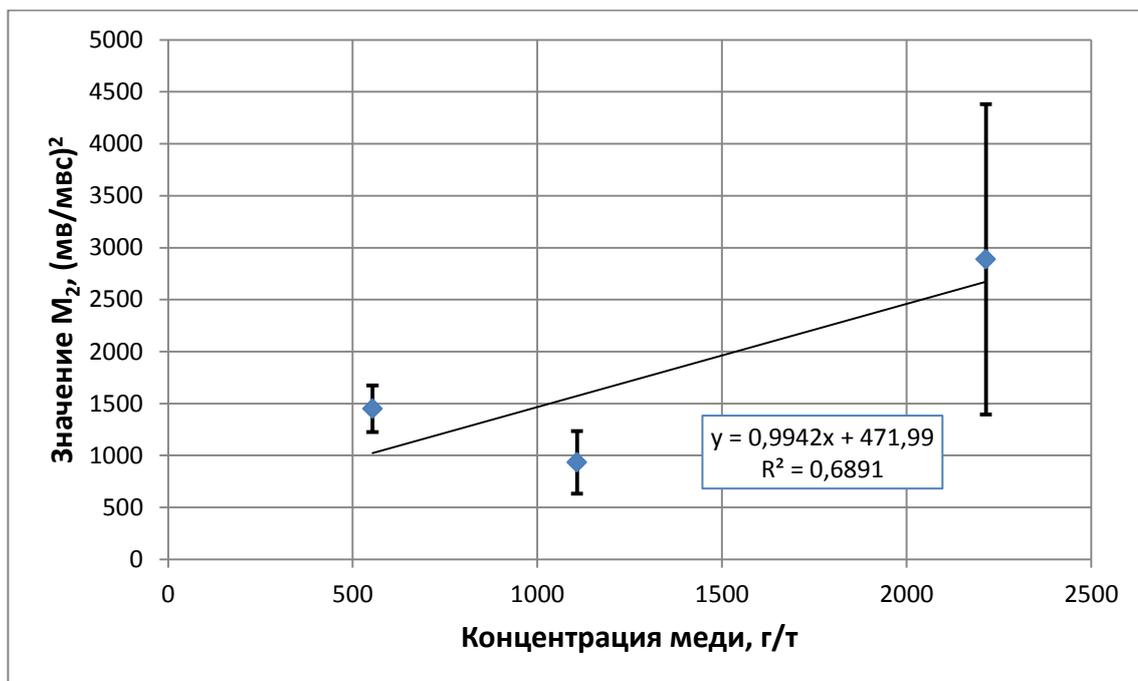


Рисунок 2.7 – Зависимость параметра (M_2) от массовой доли частиц меди для фракции от 20 мкм до 32 мкм

Представленная на рисунке 2.7 зависимость отличается от зависимостей, показанных на рисунках 2.5, 2.6 большим разбросом точек и меньшим коэффициентом аппроксимации, равным $R^2=0,69$. Пониженный коэффициент аппроксимации свидетельствует о начавшемся недоиспарении, недостаточной проработке в плазме частиц размером более 20 мкм.

Исходя из представленных выше результатов, можно сделать следующий вывод: в качестве аналитического параметра при измерении массовой доли СВЧ плазменным методом возможно использование параметра (M_2), который значительно снижает влияние размеров частиц на сигнал до границы размеров 20 мкм.

2.4. Выводы по главе

1. результаты моделирования показали, что распределение импульсных (сцинтилляционных) сигналов не повторяет распределение частиц по размерам. Установлено, что по величине единичного сцинтилляционного сигнала невозможно оценить испарившуюся массу частицы и, соответственно, эквивалентный размер частицы;
2. результаты математического моделирования показали, что для измерения массовой доли элементов в качестве аналитического параметра возможно использование параметра M_k (суммы площадей импульсов);
3. экспериментально подтверждены выводы математического моделирования, что в качестве нового аналитического параметра импульсного сигнала может быть использован интегральный параметр M_2 (сумма квадратов площадей импульсов) позволяющего снизить влияние размеров частиц на аналитический сигнал;
4. экспериментально установлено, что СВЧ плазменный метод позволяет измерять величину массовой доли элементов с высокой надежностью в

диапазоне размеров частиц от единиц мкм до 20 мкм, в этом диапазоне влияния размеров частиц на сигнал минимальны.

Глава 3. Разработка устройства ввода пробы масла в плазму и совершенствование способа регистрации импульсных сигналов.

3.1. Ультразвуковой распылитель масляных проб.

Важнейшим этапом при измерении параметров металлических частиц на СВЧ плазменном анализаторе является процедура введения пробы масла в источник возбуждения спектров (ИВС). При этом, вводимая в плазму проба, должна находиться в тонкодисперсной форме потока аэрозоля, состоящего отдельно из металлических частиц и капель масла микронных размеров. В этом случае возможно получение максимально точной информации о параметрах частиц изнашивания.

Последовательное поступление металлических частиц в ИВС позволяет измерить параметры каждой частицы. Поставленные в разделе 1 условия по параметрам потока аэрозоля могут быть соблюдены при использовании ультразвукового (УЗ) распыления пробы смазочного масла. В основу данного класса распылителей положен принцип двойного распыления [83]. Здесь жидкость подается в распылительную камеру, где со дна и стенок камеры происходит ее распыление. Полученный золь потоком транспортирующего газа через распылительную иглу (капилляр), совершающую изгибные колебания и механически соединенную под прямым углом с распылительной камерой, выносится из распылителя в плазменную горелку. При этом за счет изгибных колебаний иглы происходит вторичное распыление масла, уменьшающее размер капель.

С одной стороны, использование конструкций, описанных в работах [66–70] позволило достичь условий распыления по размерам капель, форме струи, а с другой – задача надежности работы распылителя при расположении распылительной иглы (капилляра) под прямым углом к оси акустического волновода была не решена. Как отмечалось выше, проблема заключалась в том, что зачастую происходило разрушение распыляющей иглы в месте его крепления к смесителю.

Кроме того, опыт диагностирования смазываемых узлов трения ГТД показал, что результаты диагностирования в значительной мере могут быть подвержены влиянию типа смазочного масла.

Поэтому необходимо было решение следующих задач:

- изучить влияния колебаний распыляющего капилляра на напряжения в точке его крепления относительно расположения к оси акустического волновода, формы и геометрических размеров самого капилляра;

- разработать надежную конструкцию УЗ-распылителя, позволяющую получить заданные характеристики золя при анализе авиационных проб масел независимо от их физико-химических свойств.

3.1.1. Расчет колебаний распыляющей иглы, изогнутой под прямым углом к оси акустического волновода

Для расчетов конструкции распылителя использовался программный продукт ANSYS Workbench (R19.0 Academic, R19.2 Academic, ANSYS Inc., США) [84–86]. Расчет проводился для малогабаритного акустического волновода со смесительной камерой, выполненной из титанового сплава. В качестве распыляющей иглы использовался капилляр из нагартованной нержавеющей стали с внутренним диаметром 0,8 мм и внешним 1,05 мм. Исходная геометрическая модель УЗ распылителя представлена на рисунке 3.1.

Расчеты представленной конструкции распылителя показали, что при расположении распыляющего капилляра под прямым углом к оси, максимальные напряжения возникают в области его крепления к смесителю.

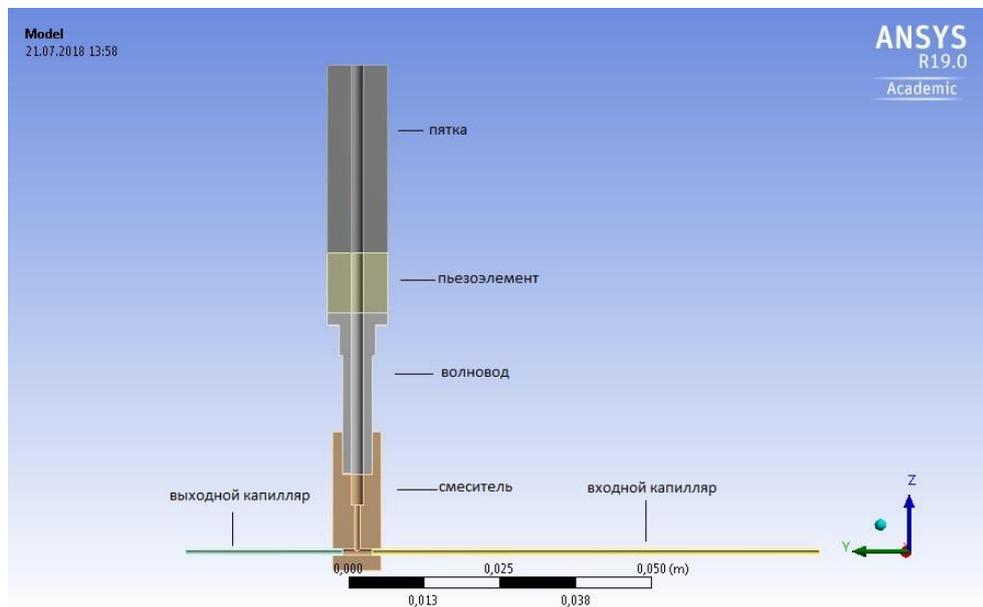
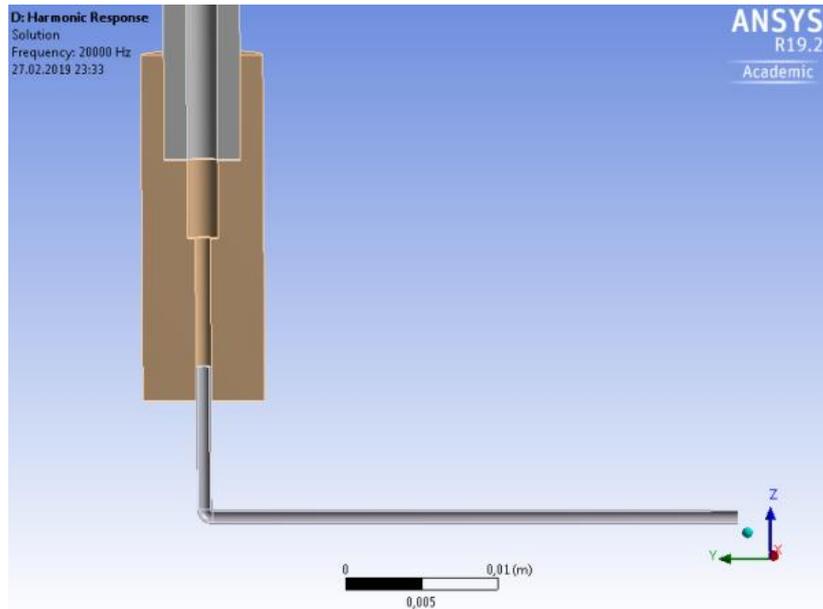
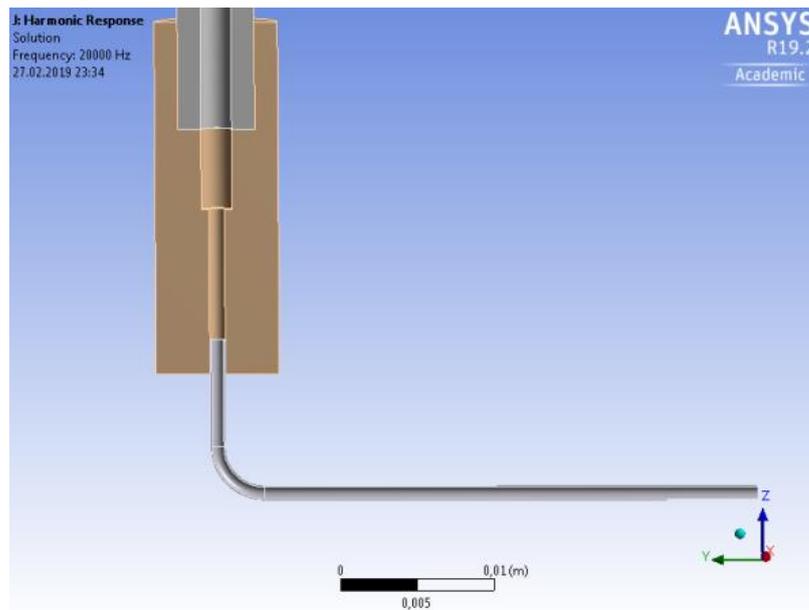


Рисунок 3.1 – Геометрическая модель ультразвукового распылителя.

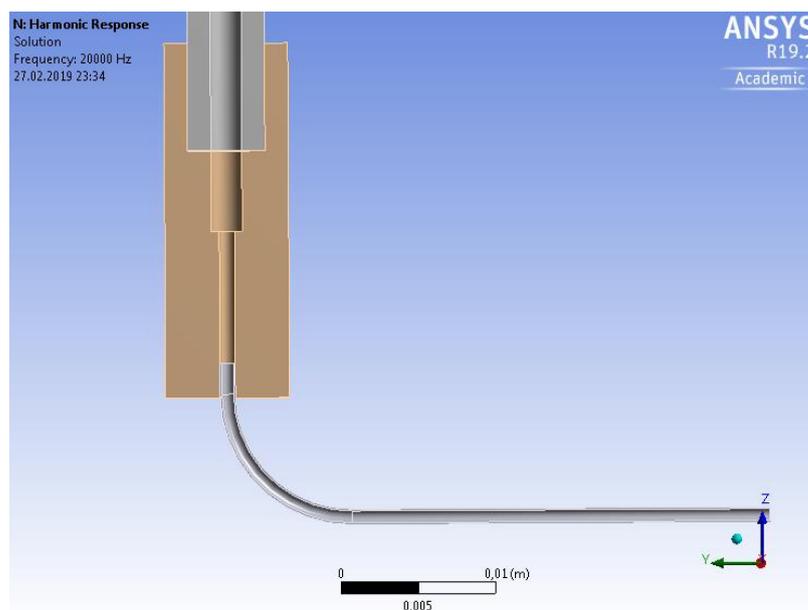
Для уменьшения напряжения распыляющего капилляра в точке крепления с рабочим телом смесителя была изменена его конструкция, позволившая сменить тип деформации с изгибной на сжатие-растяжение, при которой предел прочности металлов больше (рис. 3.2).



a)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Конструкции крепления распыляющего капилляра, используемые для расчетов с различными радиусами изгиба: а) – радиус изгиба $R=0,5$ мм; б) – радиус изгиба $R=3$ мм; в) – радиус изгиба $R=8$ мм

Если изогнуть капилляр под прямым углом и закрепить его под углом 0° к оси смесителя в нижней части, то возможно в точке крепления будут происходить продольные колебания, которые постепенно будут переходить в поперечные колебания в горизонтальной части капилляра. Очевидно, что тип колебаний будут зависеть от радиуса изгиба. При минимально возможном радиусе, равном внешнему радиусу капилляра, крепление будет фактически совпадать с креплением прямого капилляра под углом 90° к оси смесителя. В этом случае в точке изгиба будут такие же изгибные напряжения, приводящие к обрыву капилляра. При увеличении радиуса изгиба напряжения должны уменьшаться.

В расчетной модели радиус изгиба изменялся от 0,5 мм до 8 мм, чтобы исследовать влияние его на тип колебаний и распределения напряжений.

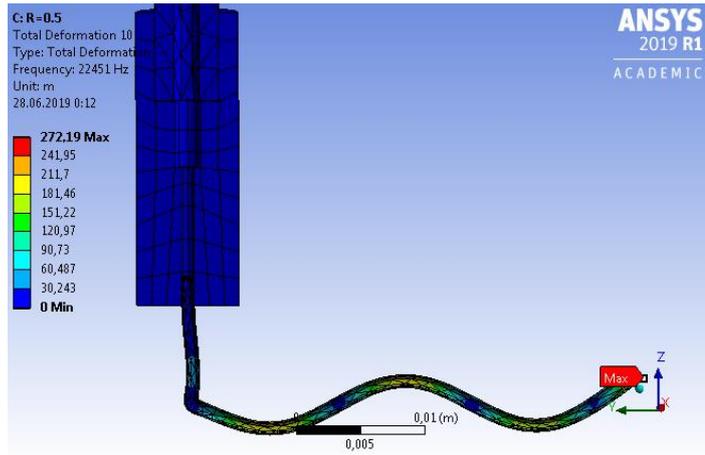
При расчетах, расстояние от нижнего среза смесителя до горизонтальной части капилляра и расстояние от оси смесителя до конца капилляра были фиксированы и равнялись 8 мм и 35 мм соответственно.

Были найдены моды собственных колебаний и их частоты в зависимости от радиуса изгиба капилляра (см. табл. 4).

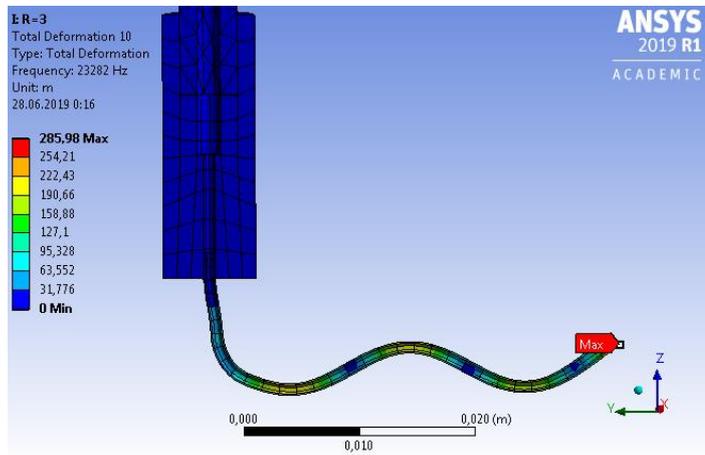
Таблица 4 – Собственные частоты колебаний ультразвукового распылителя в зависимости от радиуса изгиба капилляра

| Мода № | Собственная частота, Гц | | | | | |
|--------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | R=0.5мм | R=1мм | R=2мм | R=3мм | R=5мм | R=8мм |
| 1 | 506,53 | 503,07 | 509,53 | 528,43 | 552,17 | 575,34 |
| 2 | 950,92 | 952,15 | 952,5 | 952,86 | 953,53 | 954,62 |
| 3 | 3205,3 | 3192,3 | 3074,5 | 3189,6 | 3250,1 | 3224,9 |
| 4 | 4159,3 | 4160,8 | 4172,7 | 4180,9 | 4191,2 | 4201,5 |
| 5 | 5167 | 5114,3 | 5111 | 5560,7 | 6142,8 | 6726,1 |
| 6 | 11385 | 11369 | 11444 | 11463 | 11476 | 11484 |
| 7 | 11659 | 11626 | 11826 | 12257 | 13224 | 14665 |
| 8 | 14766 | 14768 | 14769 | 14771 | 14777 | 14969 |
| 9 | 21764 | 21763 | 21765 | 21766 | 21767 | 21770 |
| 10 | 22451 | 22355 | 22691 | 23282 | 24669 | 27125 |
| 11 | 36701 | 36504 | 36639 | 37233 | 37508 | 37538 |
| 12 | 37560 | 37559 | 37571 | 37598 | 37614 | 37616 |
| 13 | 37631 | 37627 | 37630 | 37704 | 39013 | 41861 |
| 14 | 48619 | 48619 | 48616 | 48636 | 48659 | 48693 |
| 15 | 53720 | 53110 | 52068 | 53237 | 55118 | 58680 |
| 16 | 62659 | 62459 | 62251 | 64004 | 64092 | 64099 |
| 17 | 64281 | 64272 | 64197 | 65755 | 68480 | 65025 |

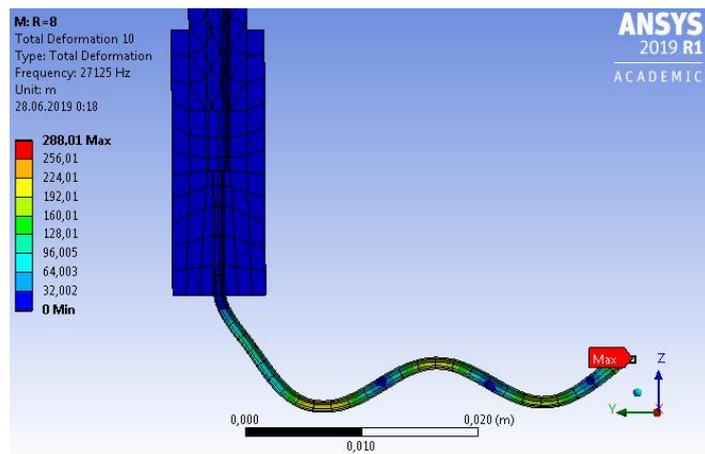
Анализ формы колебаний в диапазоне частот 10 000-70 000 Гц показал, что наиболее подходящая мода для распыления с поперечными колебаниями это №8, №10, №13 и для продольных колебаний №17. Для дальнейшего расчета гармонического отклика была выбран диапазон частот вблизи моды №10 (рис. 3.3), которая имеет подходящую частоту ~22 000 Гц и характеризуется малыми амплитудами продольных и поперечных колебаний вертикальной части капилляра и большими амплитудами поперечных колебаний горизонтальной части капилляра. Собственная частота моды №10 увеличивается с увеличением радиуса изгиба в связи с уменьшением эффективной длины горизонтальной части капилляра, в которой возбуждаются поперечные колебания.



a)



б)



B)

Рисунок 3.3 – Форма собственных колебаний моды №10 для различных радиусов изгиба: а) – радиус изгиба $R=0,5$ мм; б) – радиус изгиба $R=3$ мм; в) – радиус изгиба $R=8$ мм

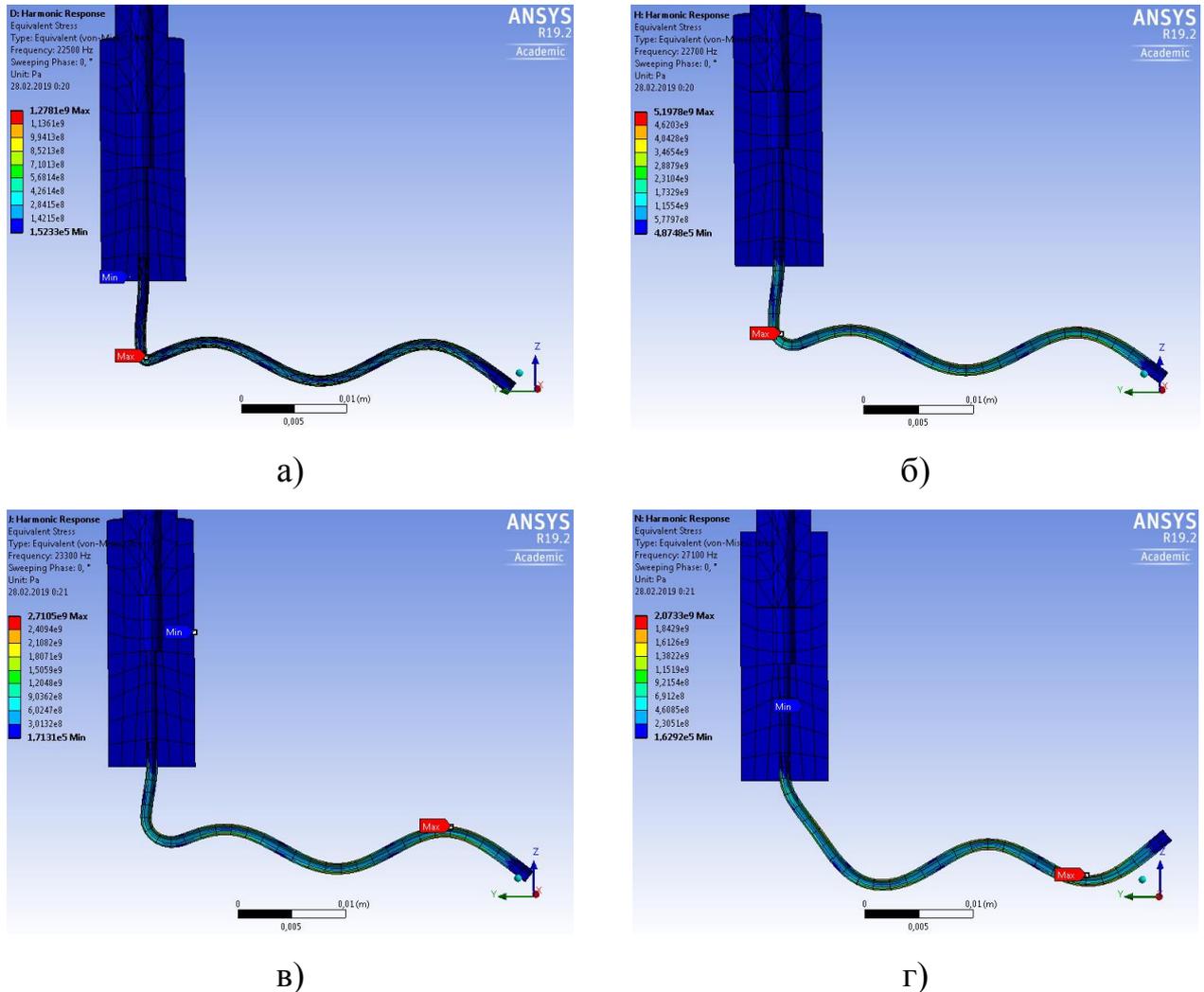
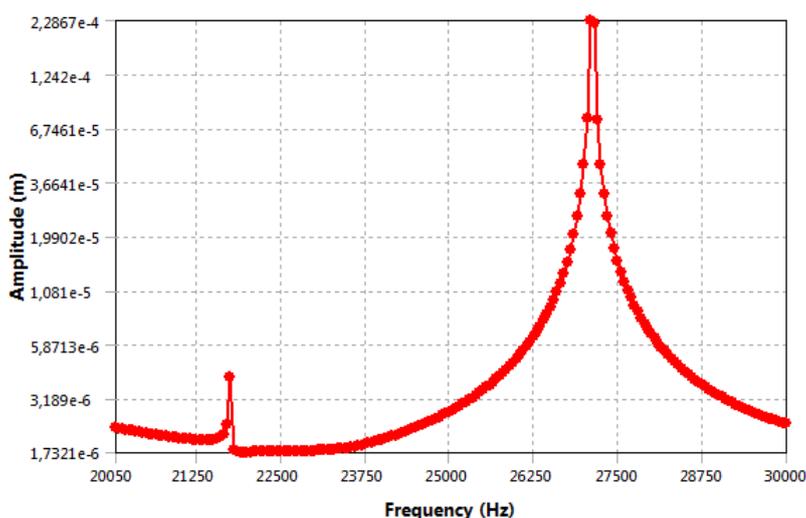


Рисунок 3.4 – Распределения напряжений на частотах близких к резонансу на моде колебания №10 в зависимости от радиуса изгиба: а) – радиус изгиба $R=0,5$ мм; б) – радиус изгиба $R=2$ мм; в) – радиус изгиба $R=3$ мм; г) – радиус изгиба $R=8$ мм

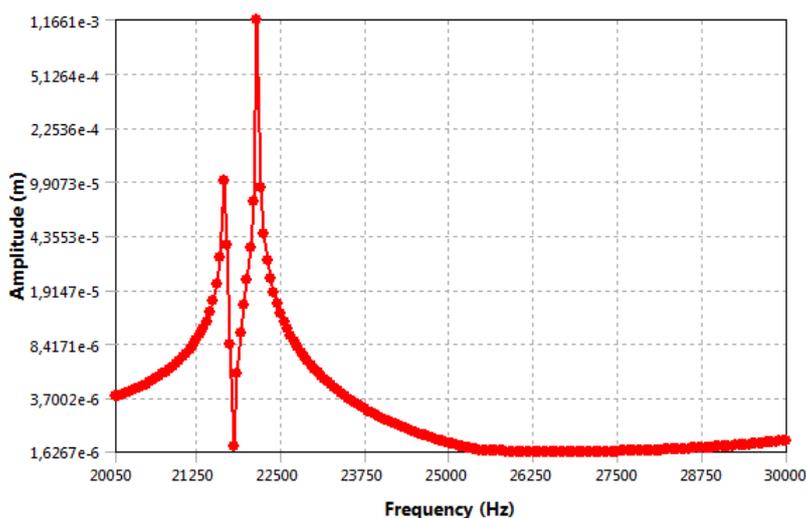
На рисунке 3.4 приведены рассчитанные распределения напряжений на частотах близких к резонансу на моде колебания №10 в зависимости от радиуса изгиба. При малых радиусах изгиба (0,5 мм, 1 мм, 2 мм) максимум напряжения приходится на область изгиба. При больших радиусах (3 мм, 5 мм, 8 мм)

область максимального напряжения перемещается в первую пучность от конца капилляра. В месте крепления капилляра со смесителем напряжения минимальны. Это означает, что при эксплуатации данной конструкции с достаточно большим радиусом изгиба не будет происходить разрушение капилляра ни в области крепления его со смесителем, ни в области изгиба.

При увеличении длины горизонтальной части капилляра до величины 39 мм, резонансная частота на моде №10 уменьшается до 22 154 Гц (рис.3.5).



а)



б)

Рисунок 3.5 – Амплитудно-частотная характеристика изогнутого капилляра при увеличении длины его горизонтальной части: а) – длина горизонтальной части капилляра 35 мм; б) – длина горизонтальной части капилляра 39 мм

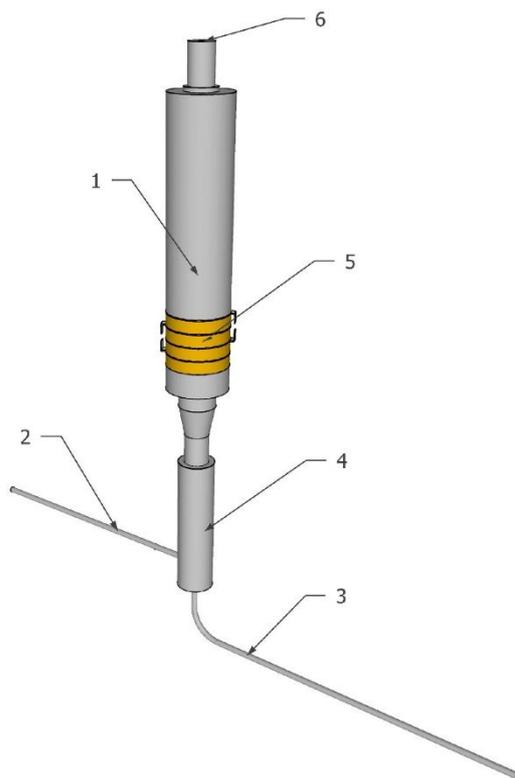
В таблице 5 приведены рассчитанные данные по амплитуде колебания конца распыляющего капилляра и максимального напряжения, возникающего в нем при приближении частоты гармонического воздействия к резонансным частотам.

Таблица 5 – Зависимость амплитуды колебания конца капилляра и максимального напряжения от радиуса изгиба.

| Радиус мм | Резонансная частота Гц | Амплитуда конца капилляра мкм | Максимальное напряжение Па |
|-----------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 0,5 | 22 500 | 123 | 1,3 е9 |
| 1 | 22 350 | 1158 | 1,2 е10 |
| 2 | 22 700 | 673 | 5,2 е9 |
| 3 | 23 300 | 345 | 2,7 е9 |
| 5 | 24 650 | 340 | 2,7 е9 |
| 8 | 27 100 | 234 | 2,1 е9 |
| 8 (длина 39 мм) | 22 150 | 1195 | 8,8 е9 |

Показано, что с увеличением радиуса изгиба от минимально возможного 0,5 мм до максимально возможного 8мм область максимального напряжения перемещается от места изгиба в область предпоследней пучности. В месте крепления капилляра со смесительной камерой напряжения минимальны. Это означает, что при эксплуатации данной конструкции с достаточно большим радиусом изгиба не будет происходить разрушение капилляра ни в области крепления его со смесителем, ни в области изгиба.

Результаты проведенных исследований использованы в конструкции УЗ распылителя, представленного на рисунке 3.6.



1 – малогабаритный акустический волновод; 2 – капилляр для подачи пробы масла; 3 – распыляющий капилляр; 4 – смесительная камера; 5 – пьезокерамические кольца; 6 – капилляр для подачи транспортирующего газа

Рисунок 3.6 – Вид рабочей конструкции ультразвукового распылителя с изогнутым распыляющим капилляром

Разработанный распылитель, показанный на рисунке 3.6, представляет собой ультразвуковой малогабаритный акустический волновод – (1), выполненный на 4-х пьезокерамических кольцах – (5) толщиной 2 мм, внешним и внутренним диаметром 10 мм и 5 мм, соответственно. На акустический волновод с помощью резьбового соединения крепится смесительная камера 4, выполненная из сплава ВТЗ-1. Стальная трубка (2) служит для подачи пробы масла в смесительную камеру. Трубка (3) является распыляющей. Обе трубки с натягом впрессовываются в боковое и нижнее отверстия смесительной камеры. Вдоль оси ультразвуковой колебательной системы имеется канал (6) для подачи транспортирующего газа в смесительную камеру (4).

Устройство работает следующим образом. По трубкам (2) и (6) в смесительную камеру – (4) подаются проба масла и транспортирующий газ (воздух). В насадке жидкость смешивается с потоком транспортирующего воздуха, под действием ультразвуковых колебаний образует воздушно-капельную смесь, которая выводится через распыляющую трубку (3), превращаясь в мелкодисперсный золь. Транспортирующий газ служит для создания направленного потока аэрозоля.

Результаты, полученные в ходе моделирования, были реализованы в экспериментальной модели распылителя со следующими параметрами распыляющего металлического капилляра:

- диаметр капилляра внутренний 0,85 мм;
- диаметр капилляра внешний 1,05 мм;
- длина капилляра 58 мм
- радиус изгиба 8 мм;

При частоте ультразвукового генератора 19,7 кГц получено устойчивое пыление с требуемыми параметрами к получаемому золью, после чего было проведено дополнительное моделирование конструкции с удлинённым капилляром.

В случае с капилляром длиной 58 мм собственная частота 12 моды колебаний составила 22168 Гц, расчетная амплитудно-частотная характеристика приведена на рисунке 3.7.

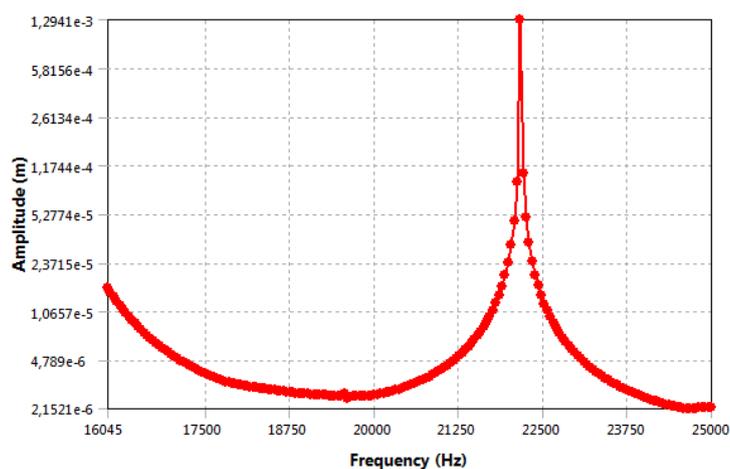
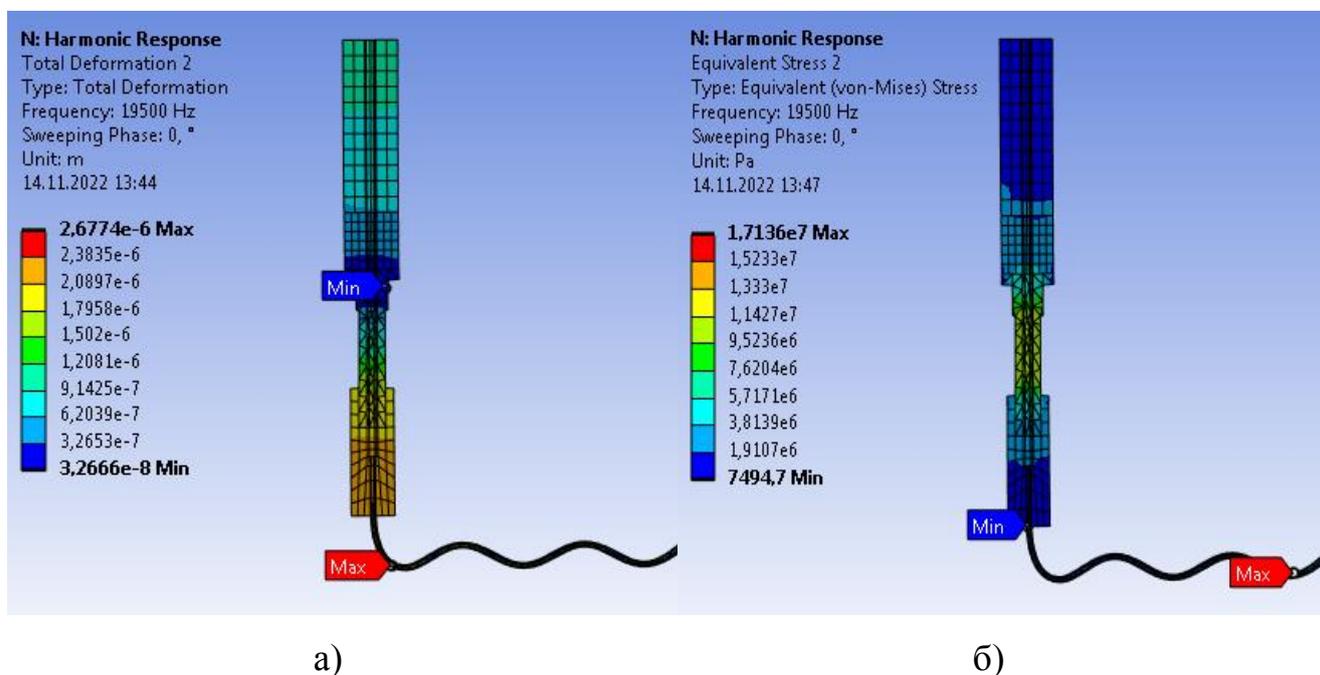
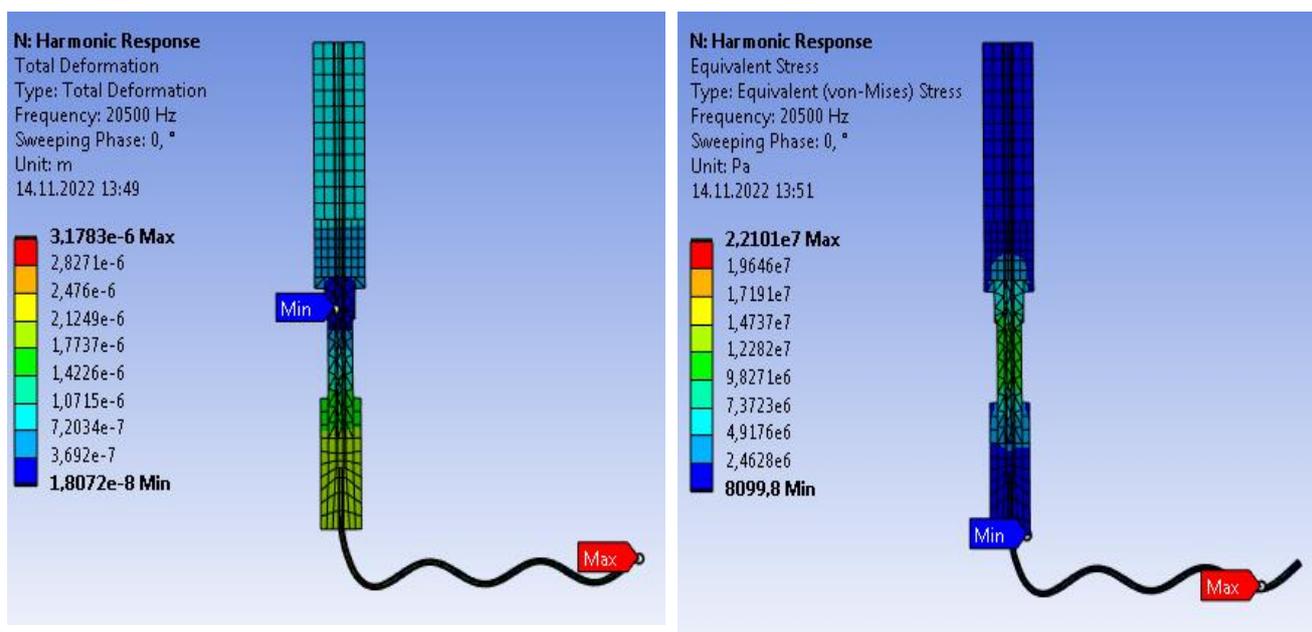


Рисунок 3.7 – Амплитудно-частотная характеристика распыляющего капилляра длиной 58 мм и радиусом загиба 8 мм

Следует пояснить, что каждой длине капилляра соответствует индивидуальный диапазон частот УЗ генератора, при котором происходит пыление. Для капилляра длиной 58 мм начало диапазона пыления составляет 19,0 кГц, конец диапазона – 22,5 кГц. Однако устанавливать резонансную частоту в соответствии с рисунком 3.7 нерационально по нескольким причинам. Во-первых, резонанс очень «узкий» и для длительного потокового анализа будет необходимо реализовать автоматическую подстройку частоты, что бы снизить влияние системы распыления и ввода пробы на результаты анализа. Во-вторых, работа распылителя в условиях резонанса может сократить срок службы капилляра практически в два раза.

Результаты моделирования напряжения и амплитуды колебаний распыляющего капилляра длиной 58 мм для рабочих частот 19,5 кГц и 20,5 кГц приведены на рисунке 3.8.





в)

г)

Рисунок 3.8 – Напряжения и амплитуды изогнутого капилляра на рабочих частотах: а) – амплитуда (м) на частоте 19,5 кГц; б) – напряжения (Па) на частоте 19,5 кГц; в) – амплитуда (м) на частоте 20,5 кГц; г) – напряжения (Па) на частоте 20,5 кГц

Проведенные в течении нескольких лет в ежедневном режиме испытания конструкции УЗ распылителя с изогнутым распыляющим капилляром радиусом 8 мм, длиной 58 мм и выбранной частоте УЗ генератора 19,7 кГц показали, что проблема наработки распылителя на отказ во многом решена. Так, капилляр за год работы распылителя менялся не более двух раз и замена была связана, чаще всего, с качеством крепления капилляра к смесительной камере.

Таким образом, разработанная новая конструкция УЗ распылителя с изогнутым капилляром под прямым углом к оси акустического волновода обладает ресурсом работы не менее 2 500 часов, что сопоставимо с наработкой СВЧ генератора плазмы. Данная конструкция защищена патентом РФ на полезную модель [87] и использовалась в составе СВЧ плазменного анализатора в настоящей работе.

3.2. Экспериментальная оценка размеров капель золя в зависимости от температурных условий распыляемого масла

В качестве анализируемых проб нами использовалось смазочное масло МС–8П, которое применялось в качестве рабочей жидкости в российских авиационных газотурбинных двигателях (ГТД). В настоящее время МС–8П применяется, в основном, для консервации ГТД и изготовления стандартных образцов СОЧПИ, необходимых для градуирования СВЧ плазменного анализатора. Таким образом, узел распыления и подачи пробы в СВЧ анализаторе адаптирован для распыления проб масла МС–8П. На замену МС–8П пришли современные полусинтетические и синтетические масла с улучшенными смазывающими свойствами, типа TN–400, TN–600, MT–319, ИПМ–10.

Переход от анализа минерального масла МС-8П к синтетическим маслам типа TN–400, TN–600 показал следующее.

При анализе масел TN–400 и TN–600 достаточно большое количество пробы уходило в слив и, главное, через небольшой промежуток времени (время работы анализатора 20-30 минут) каплями масла забрызгивалась линза, установленная перед входной щелью полихроматора. Забрызгивание линзы приводило к уменьшению светопропускания и систематическому смещению результатов анализа. Очевидно, что большое количество пробы, уходящее в слив и капли масла на линзе свидетельствовали о неполном сгорании капель в плазменной струе и недостаточной проработке металлических частиц в плазме.

Одним из параметров, определяющих размер капель распыляемой жидкости при СВЧ плазменных измерениях является ее вязкость. Опыт анализа смазочных масел показал, что чем больше вязкость масла, тем хуже происходит процесс распыления, тем больше образуется крупных капель, приводящих к ухудшению результатов анализа. Поэтому необходимо проведение исследований по изучению влияния вязкости новых смазочных масел на размер

капель струи аэрозоля, предложить способ, в котором снижены (отсутствуют) влияния типа смазочного масла на результаты измерения параметров металлических частиц изнашивания.

3.2.1. Экспериментальная оценка размеров капель золя в зависимости от температурных условий распыляемого масла

Измерения размеров капель для предложенной конструкции распылителя были проведены для пяти марок масла: МС–8П, TN–400, TN–600, МТ–319, ИПМ–10. Для этого был использован способ осаждения масла на поверхностно-активное вещество (ПАВ) [88; 89]. Масло распылялось со скоростью 50 мкл/мин, частоте ультразвуковых колебаний генератора 19,7 кГц и расходе транспортирующего газа 0,2 л/мин. Капли, осажденные на ПАВ, сохраняли устойчивую форму в течение нескольких минут и за это время фотографировались под микроскопом с цифровой камерой (рис. 3.7). По полученным снимкам с использованием специально разработанного ПО [89] измеряли диаметр капель для каждого типа масла и строили распределения по их размерам (рис. 3.8–3.12).



Рисунок 3.7 – Капли масла на ПАВ. Снимок выполнен под микроскопом с цифровой камерой

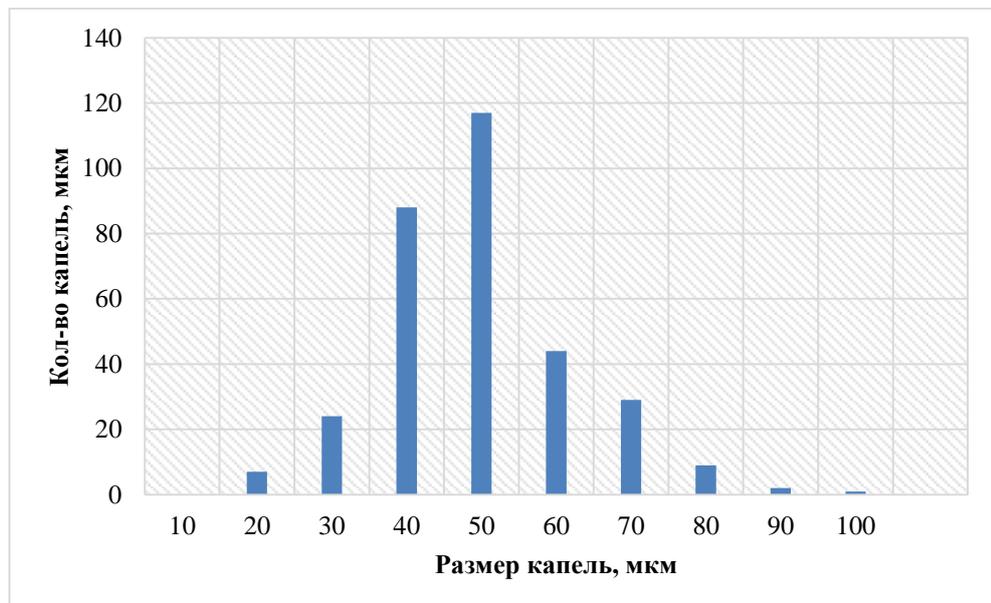


Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения капель по размерам для масла МС-8П при $T_{\text{масла}}=25^{\circ}\text{C}$

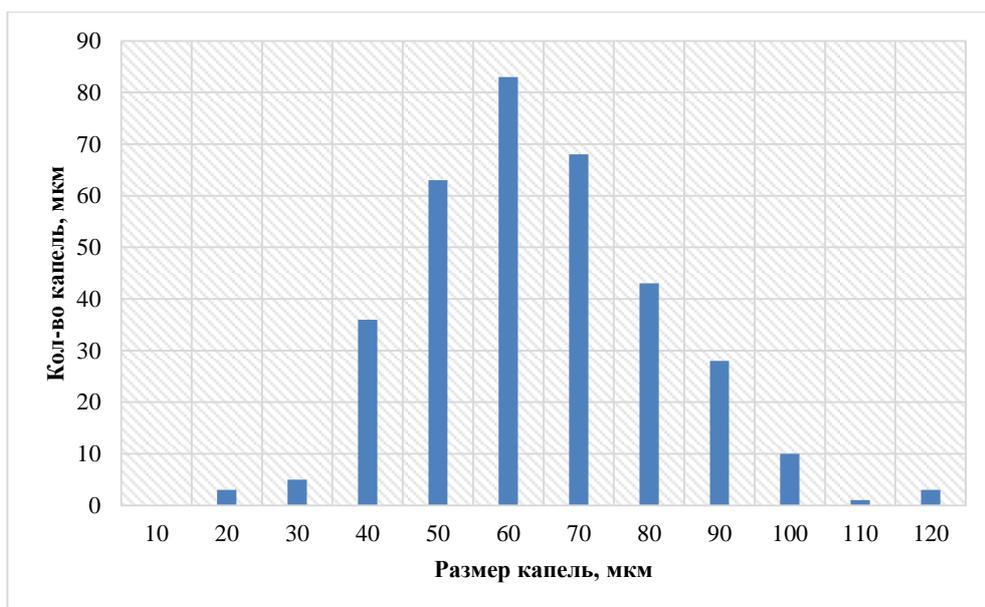


Рисунок 3.9 – Гистограмма распределения капель по размерам для масла ИПМ-10 при $T_{\text{масла}}=25^{\circ}\text{C}$

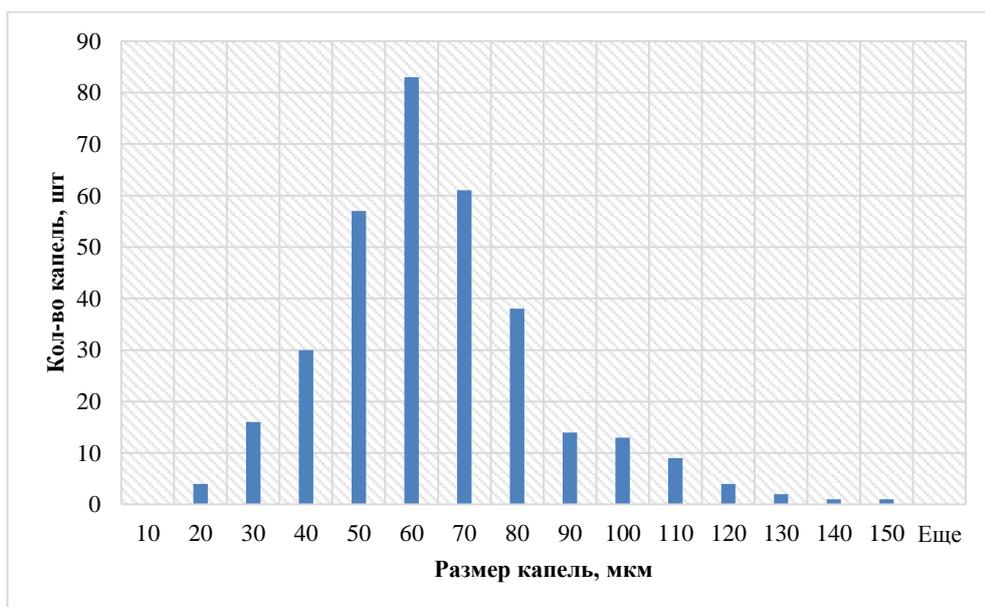


Рисунок 3.10 – Гистограмма распределения капель по размерам для масла МТ-319 при $T_{\text{масла}}=25^{\circ}\text{C}$

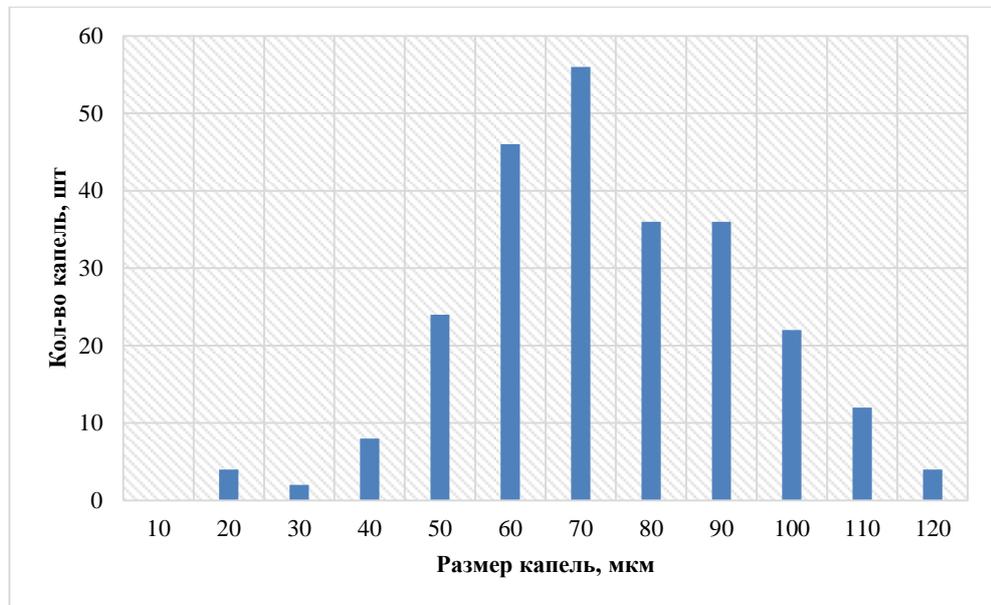


Рисунок 3.11 – Гистограмма распределения капель по размерам для масла TN-400 при $T_{\text{масла}}=25^{\circ}\text{C}$

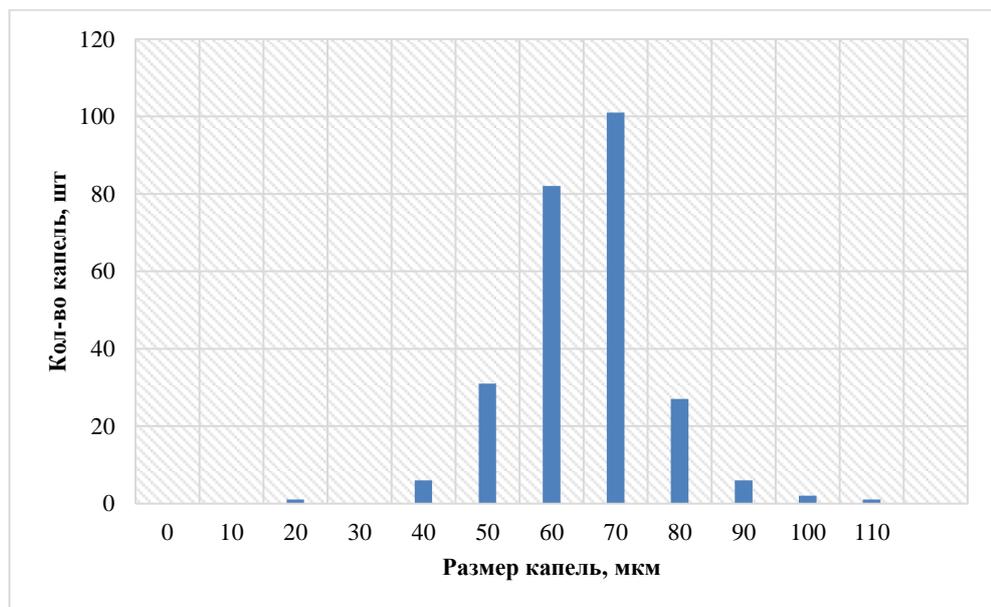


Рисунок 3.12 – Гистограмма распределения капель по размерам для масла TN-600 при $T_{\text{масла}}=25^{\circ}\text{C}$

Представленные распределения на рисунках 3.8–3.12 свидетельствуют, что при $T=25^{\circ}\text{C}$ независимо от типа масла общим является правый край распределений с максимальным размером капель до 130-150 мкм.

Максимум распределений в минеральных маслах приходится на 50–60 мкм, для синтетических TN–400, TN–600 смещен до 70 мкм.

Одним из параметров, определяющих размер капель распыленной жидкости при СВЧ плазменных измерениях является ее вязкость. Опыт анализа смазочных масел показал, что чем больше вязкость масла, тем хуже происходит процесс распыления, тем больше образуется крупных капель, приводящих к ухудшению работы анализатора.

Измерения вязкости масел были проведены в испытательной лаборатории контроля качества горюче-смазочных материалов в АО «Международный аэропорт Иркутск». Результаты измерений приведены в таблице 6.

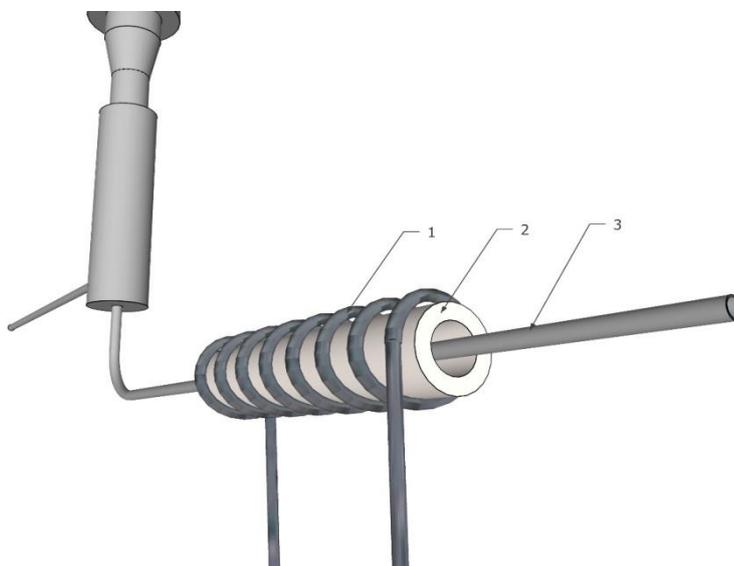
Таблица 6 – Результаты измерения вязкости смазочных масел при температурах 25°C и 100°C

| Смазочное масло | Вязкость масел при температуре 25°C, мм ² /с | Вязкость масел при температуре 100°C, мм ² /с |
|-----------------|---|--|
| МС–8П | 11,5 | 5,5 (50°C) |
| ИПМ–10 | 27,9 | 3,7 (100°C) |
| МТ–319 | 29,6 | 3,8 (100°C) |
| TN–400 | 32,2 | 4,1 (100°C) |
| TN–600 | 47,6 | 5,1 (100°C) |

Из таблицы 6 видно, что при температуре 25°C вязкость масла МС–8П относительно TN–400 различается почти в 3 раза, при увеличении температуры до 100°C различие в вязкости несущественно. Это означает, что если действительно размеры капель аэрозоля связаны с вязкостью масла, то снижение такого влияния возможно за счет нагрева анализируемой пробы масла. Технически такая реализация выполнима нагревом капилляра распылителя до температуры, устраняющей данное влияние.

Длительность экспозиции при проведении СВЧ плазменных измерений составляет 10 минут. Измерения показали, что движение пробы масла по стальному капилляру с внутренним диаметром $d=0,85$ мм, со скоростью 50 мкл/мин от шприца-дозатора до распылительной системы приводит к тому, что масло в шприце-дозаторе, нагретое до 100°C к моменту распыления остывает до комнатной температуры.

Для нагрева масла в течении всего времени экспозиции, поддерживающего постоянную температуру в области распыляющего капилляра, было разработано специальное устройство (рис. 3.13). Устройство представляет нагревательный элемент, состоящий из нихромовой проволоки (1), намотанной на алундовую трубку (2). Внутренний диаметр алундовой трубки 3,5 мм. Нагревательный элемент закреплялся непосредственно перед плазменной горелкой таким образом, чтобы распыляющий капилляр УЗ распылителя проходил сквозь алундовую трубку, не соприкасаясь с ее стенками.



1 – нагревательная спираль, 2 – алундовая трубка, 3 - распыляющий капилляр.

Рисунок 3.13 – Схема нагревательного устройства на УЗ распылителе.



Рисунок 3.14 – Внешний вид устройства для нагревания пробы масла перед подачей в плазменную горелку

На спираль нагревательного элемента подавалось регулируемое напряжение. С помощью термопары была измерена температура внутри нагревательного элемента с максимальным значением 203°C . Такое значение температуры гарантировало сохранение упругих свойств распыляющего капилляра, рабочих свойств УЗ распылителя.

Температура распыленного масла также измерялась с помощью термопары. При температуре нагревательного элемента 203°C , температура масла на выходе из распылителя составила 85°C . На способ снижения влияния вязкости масла на результаты измерений параметров частиц и устройство для его реализации получен патент РФ на полезную модель [90].

При проведении дальнейших исследований были выбраны пробы масел МС–8П и TN–400. Такой выбор обусловлен следующим.

При анализе проб масла МС–8П при температуре 25°C капли золя в воздушной плазме сгорали полностью, входная линза полихроматора долгое

время оставалась чистой. Полученные ранее результаты на МС–8П верифицированы с помощью независимых методов.

При анализе TN–400 после двух-трех параллельных измерений (время работы анализатора 20-30 минут) линза забрызгивалась, подача пробы выключалась, линза промывалась и анализ начинался сначала. Задача состояла в подборе условий для TN–400, при которых долгое время сохраняется работоспособность анализатора и результаты измерения параметров частиц при анализе пробы на основе TN–400 не должны отличаться от результатов анализа пробы на основе МС–8П.

Для оценки влияний размеров капель смазочного масла на результаты измерений параметров частиц при СВЧ плазменном анализе были подготовлены пробы на основе масел МС–8П и TN–400 с введенным порошком ГСО СОЧПИ-4.

Стандартный образец состава ГСО СОЧПИ-4 представляет собой сухой, инертный и безопасный порошок, приготовленный из смыва осадка продуктов изнашивания с фильтров маслосистемы исправных авиационных двигателей, промытого органическими растворителями, с размером частиц не более 60 мкм.

Массовая доля элементов-примесей в приготовленном головном образце и МОС-2 приведена в таблице 7.

Таблица 7 – Массовая доля (г/т) элементов-примесей в головном масляном образце МОС-10 и МОС-2.

| | Ag | Cr | Cu | Fe | Mg | Ni |
|----------|------|------|-------|-------|------|------|
| МОС - 10 | 1,3 | 1,84 | 10,17 | 20,16 | 4,1 | 0,74 |
| МОС - 2 | 0,26 | 0,37 | 2,03 | 4,03 | 0,82 | 0,15 |

Из «головного масляного образца МОС-10» весовым методом, путем последовательного разбавления маслами МС–8П и TN–400 получали образцы

МОС-2 с массовой долей меди 2,03 г/т, железа 4,03 г/т и т.д. Далее, приготовленные пробы анализировались на СВЧ плазменном анализаторе.

Подготовленные стандартные образцы анализировали при температуре 25°C, а также с подогревом масла до температуры 85°C. Каждый образец анализировали пять раз, для каждого анализа производили по пять параллельных измерений. На основе полученных данных построены графики зависимости изменения параметров металлических частиц в растворе ГСО СОЧПИ-4 приготовленных на разных масляных основах при разной температуре масла.

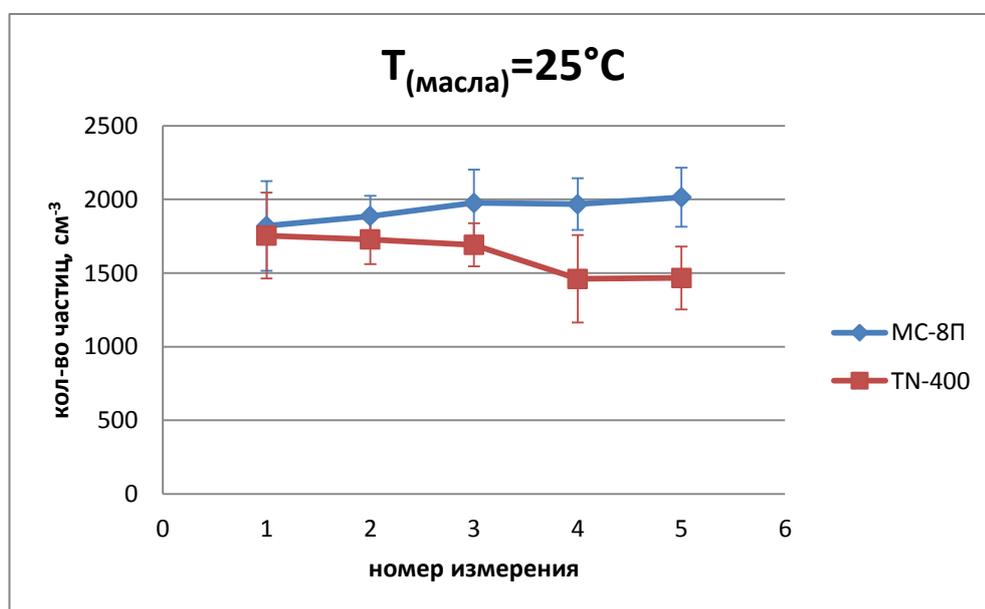


Рисунок 3.15 – Зависимость количества импульсов (частиц изнашивания) на канале Fe для масляных основ МС–8П и TN–400 при $T_{(\text{масла})}=25^{\circ}\text{C}$

Из рисунка 3.15 видно, что в МОС-2 на МС–8П значение количества импульсов на канале железа практически не меняется. Минимальное значение $N_{(\text{Fe})}=1820 \text{ см}^{-3}$, максимальное $N_{(\text{Fe})}=2015 \text{ см}^{-3}$, что укладывается в погрешность измерения метода.

Для МОС-2 на TN–400 наблюдается снижение количества зарегистрированных импульсов на канале железа с каждым последующим измерением. Максимальное значение $N_{(\text{Fe})}=1754 \text{ см}^{-3}$, минимальное $N_{(\text{Fe})}=1467 \text{ см}^{-3}$.

Тенденция снижения количества зарегистрированных импульсов железа в МОС-2 на масле TN-400 связана с проработкой аналитического материала в плазме. Масло TN-400 более вязкое относительно МС-8П, при распылении TN-400 образуются более крупные капли масла, что приводит к неполному их испарению в плазме и, соответственно, загрязнению защитного стекла входной линзы полихроматора (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Защитное стекло входной линзы полихроматора загрязнённое каплями золя масла TN-400

Капли несгоревшего масла TN-400 выносятся потоком газа на защитное стекло, начиная с первого измерения, что отчетливо видно на графике (рис. 3.15). С каждым последующим измерением количество капель на защитном стекле увеличивается, что приводит к большему снижению количества регистрируемых импульсов.

На рисунке 3.17 приведена зависимость количества импульсов железа, зарегистрированных в пробах МОС-2, приготовленных на масляных основах МС–8П и TN–400 с подогревом.

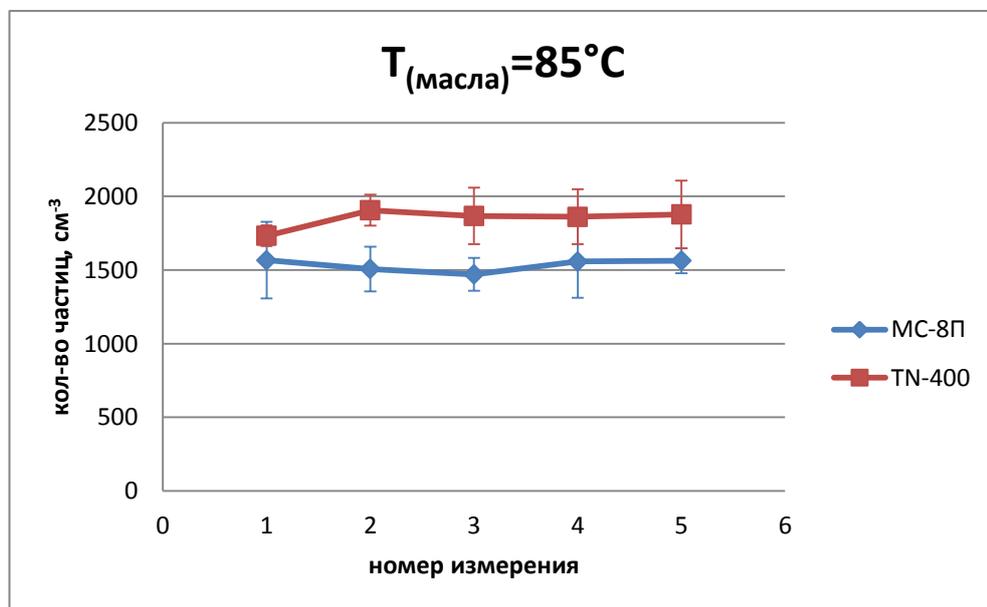


Рисунок 3.17– График зависимости количества импульсов на канале Fe для масляных основ МС–8П и TN–400 при $T_{(масла)}=85^{\circ}\text{C}$

Для обоих типов масел наблюдается устойчивое значение количества зарегистрированных импульсов железа. Конкретно для МОС-2 на масле TN–400 загрязнения входной линзы полихроматора не наблюдается, следовательно, подогрев масла до температуры 85°C снижает вязкость до оптимального значения, что позволяет получать золь с параметрами удовлетворяющими требованиям СВЧ плазменного анализа. Как следствие на защитном стекле линзы конденсора отсутствуют капли непроработанного масла.

Были проведены измерения размеров капель золя масел МС–8П и TN–400 нагретых до 85°C . Полученные распределения по размерам капель золя представлены на рисунках 3.18 и 3.19, соответственно. Из рисунков видно, что при нагревании максимум распределения сместился на 40 мкм для обоих типов масел. Максимальный размер капель достигает 140 мкм, стоит отметить, что

образование крупных капель может происходить за счет сливания нескольких мелких капель в потоке золя во время полета.

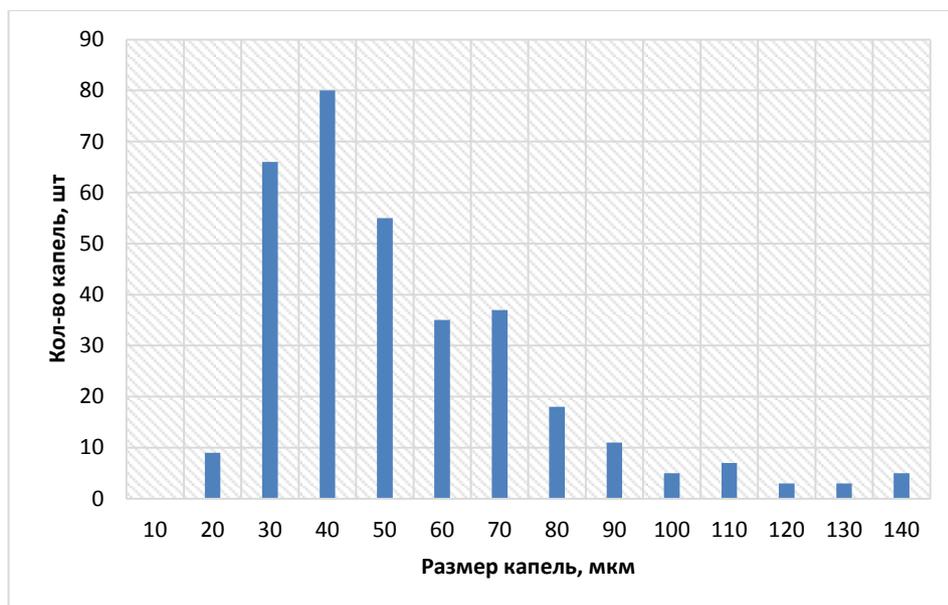


Рисунок 3.18 – Гистограмма распределения капель по размерам для масла
MC–8П при $T_{\text{масла}}=85^{\circ}\text{C}$

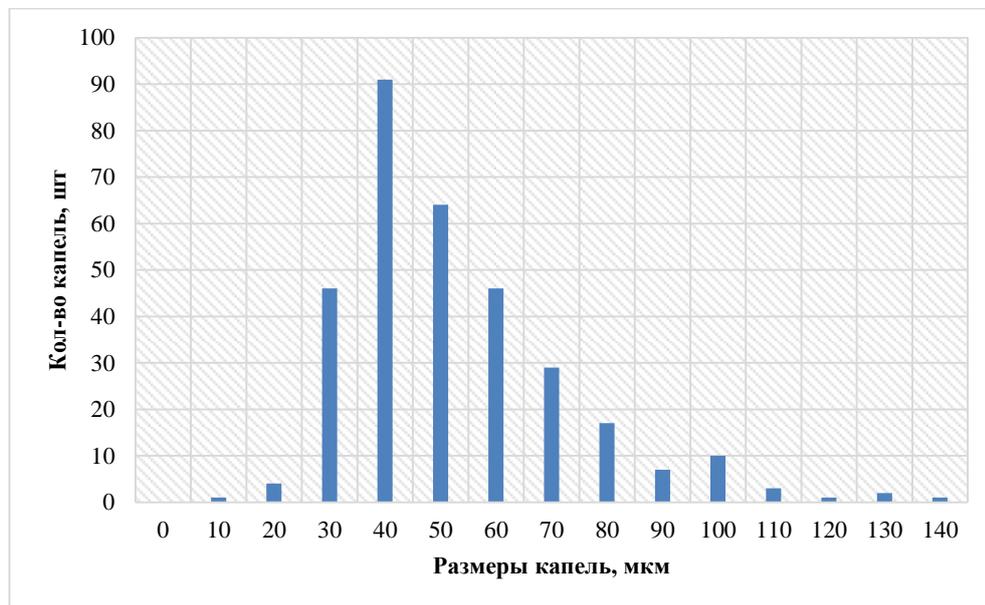


Рисунок 3.19– Гистограмма распределения капель по размерам для масла
TN–400 при $T_{\text{масла}}=85^{\circ}\text{C}$

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. измерения вязкости пяти типов масел (МС–8П, ИПМ–10, МТ–319, ТН–400, ТН–600) показали, что при температуре 25°C (комнатная, лабораторная температура) вязкость масла МС–8П относительно ТН–400 различается в 3 раза, при увеличении температуры до 100°C различие в вязкости несущественно;
2. проведены измерения размеров капель проб масел при ультразвуковом распылении при температурах 25°C и 85°C. При температуре 25°C максимум распределения в минеральных маслах (МС–8П, ИПМ–10, МТ–319) приходится на 50-60 мкм, в синтетических (ТН–400, ТН–600) максимум смещен вправо до 70 мкм. Правый край распределений независимо от типа масла ограничен размерами 130-150 мкм. При температуре 85°C максимум распределения для МС–8П и ТН–400 наблюдается при 40 мкм, правый край распределений не более 140 мкм;
3. для масла ТН–400 при температуре $T=85^{\circ}\text{C}$ входная линза полихроматора остается чистой, на ней отсутствуют следы капель масла. Ранее, при анализе ТН–400 и температуре масла 25°C линза забрызгивалась маслом после 2-3 параллельных измерений. Отсюда следует, что при распылении масла при температуре $T=85^{\circ}\text{C}$ образуются более мелкие капли, которые полностью сгорают в СВЧ плазменной струе, чем объясняется отсутствие следов масла на входной линзе полихроматора.

3.3. Оптимизация условий измерения элементного состава при СВЧ плазменных измерениях

При СВЧ плазменных измерениях в течение экспозиции от каждого появившегося импульса на каждом канале записывается следующая

информация: время появления, длительность и площадь импульса. По окончании экспозиции импульсы обрабатываются в порядке появления.

Элемент самого первого импульса обозначается как основа формируемого элементного состава частицы. Все последующие импульсы, зарегистрированные от металлических частиц, попавшие по своему времени появления в интервал совпадения двух импульсов, считаются составными частями этой частицы. Интервалом совпадения является отрезок времени «время появления» плюс «длительность импульса». Следующий по появлению импульс, не попадающий в интервал совпадения первого, считается самостоятельной частицей со своими частями, определяемыми по тому же принципу.

Если в интервале совпадения (длительности импульса) ввести дополнительный безразмерный множитель K , то с его помощью можно регулировать точность совпадения фронтов импульсов от различных частиц для отнесения их к одной многоэлементной частице

$$W = R * K \quad (3.1)$$

где: R – длительность импульса, W – интервал совпадения, K – коэффициент.

В случае, когда коэффициент $K=1$, то интервал совпадения фронтов равен длительности первого импульса, и все последующие импульсы, время появления которых было зарегистрировано во время регистрации первого, будут входить в состав одной многоэлементной частицы (рис. 3.19).

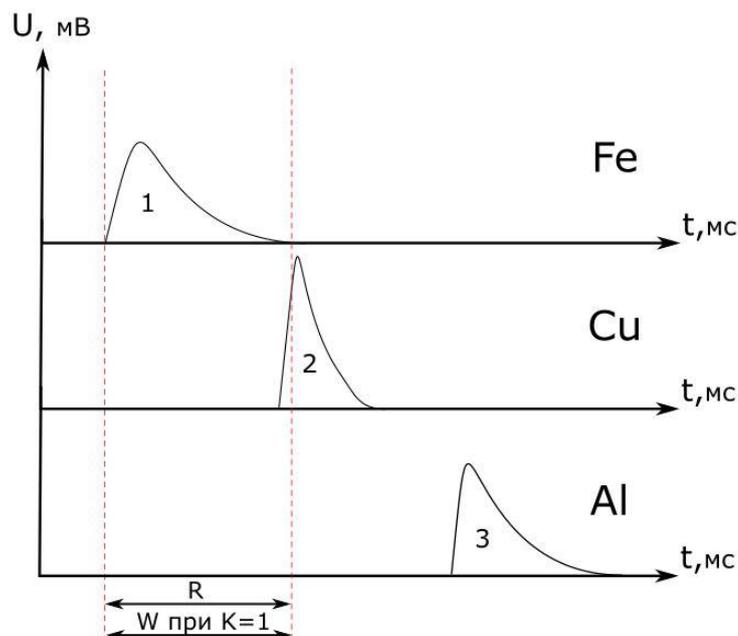


Рисунок 3.20 – Обработка импульсов частицы, состоящей из двух элементов

Для случая, изображенного на рисунке 3.20, будет зарегистрирована частица, состоящая из двух элементов Fe-Cu и одноэлементная частица Al.

На рисунке 3.21 приведен пример работы алгоритма выделения двухкомпонентной частицы Fe-Cu и однокомпонентных частиц Fe и Cu. Рисунок показывает, что импульс становится компонентом частицы, состоящей из двух и более элементов, если его начало попадает в определенный интервал времени от начала другого импульса. Видно, что при одинаковой ширине интервала совпадения импульса 1, 2 характеризуют частицу, состоящую из двух элементов Fe и Cu, а импульсы 3, 4 характеризуют одноэлементные частицы Fe и Cu. Регулируя интервал совпадения W можно добиться минимального количества случайно совпадающих импульсов.

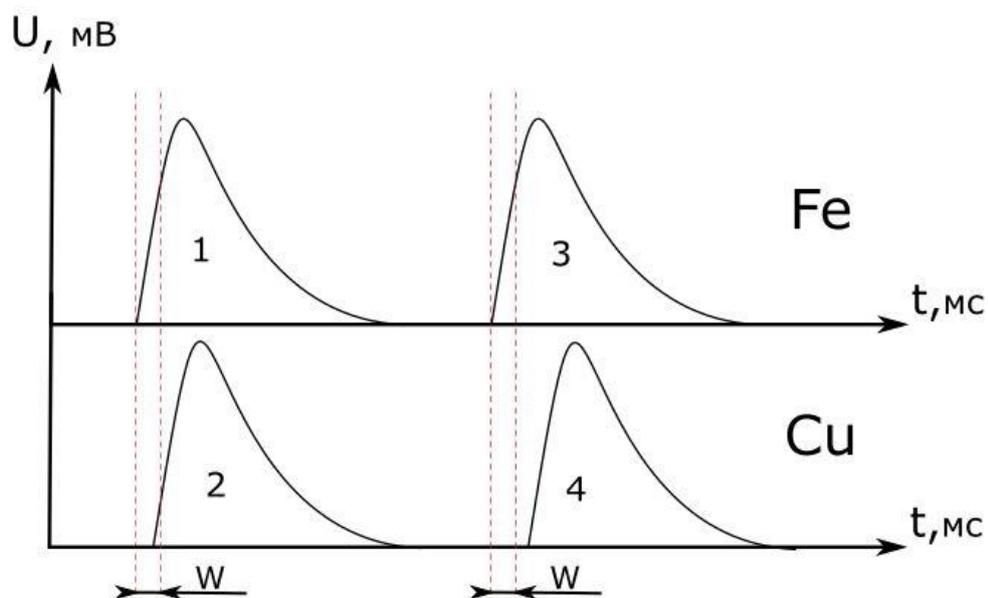


Рисунок 3.21 – Пример выделения двухкомпонентной частицы Fe-Cu (импульсы 1 и 2) и двух однокомпонентных частиц Fe и Cu (импульсы 3 и 4)

Таким образом, варьируя интервал совпадения фронтов W можно существенно влиять на достоверность определения элементного состава частицы при регистрации СВЧ плазменным методом в реальных частицах изнашивания.

Смысл проведения экспериментов на одноэлементных порошках заключался в том, что если в пробе присутствуют в достаточно большом количестве одноэлементные «простые» частицы, то возникает ситуация, когда фронты импульсов от таких частиц могут случайно совпадать на разных каналах и идентифицироваться как частицы, состоящие из двух и более элементов («сложные частицы»). Задача состояла в устранении, либо снижении до минимума числа случайных совпадений импульсов при анализе проб с одноэлементными частицами.

В реальных пробах соотношение между элементами в частицах изнашивания зависит от типов используемых сплавов. Наиболее близко реальным пробам соответствует Государственный стандартный образец (ГСО) СОЧПИ-4 [58]. Поэтому для проведения дальнейших экспериментов необходимо было создать имитацию образца СОЧПИ-4.

Масляные пробы «Имитация СОЧПИ-4» готовились путем введения одноэлементных металлических порошков в объем «чистого» масла МС-8П, добиваясь возможно близкого соотношения между количеством зарегистрированных импульсов в ГСО СОЧПИ-4 и образце «Имитация СОЧПИ-4».

Результаты СВЧ плазменного анализа ГСО СОЧПИ-4 и «Имитация СОЧПИ-4» представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнительные результаты СВЧ плазменного анализа оригинального ГСО СОЧПИ-4 и образца пробы «Имитация СОЧПИ-4»

| ГСО СОЧПИ-4 | | | «Имитация СОЧПИ-4» | | |
|-----------------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------|
| Элемент | $N, \text{см}^3$ | $N_{\text{пр}}, \text{см}^3$ | Элемент | $N, \text{см}^3$ | $N_{\text{пр}}, \text{см}^3$ |
| Al | 265 | 140 | Al | 275 | 181 |
| Cr | 815 | 185 | Cr | 907 | 760 |
| Ni | 102 | 29 | Ni | 82 | 64 |
| Mg | 3089 | 453 | Mg | 2505 | 2151 |
| Fe | 1804 | 663 | Fe | 1872 | 1606 |
| Cu | 6915 | 4089 | Cu | 5865 | 5346 |
| V | 2 | 0 | V | 5 | 4 |
| $\sum N, \text{см}^3$ | | 13760 | $\sum N, \text{см}^3$ | | 11515 |
| $\sum N_{\text{пр}}, \text{см}^3$ | | 5827 | $\sum N_{\text{пр}}, \text{см}^3$ | | 10114 |
| Кол-во составов «сложных» частиц | | 83 | Кол-во составов «сложных» частиц | | 48 |
| Кол-во «сложных» частиц | | 3028 | Кол-во «сложных» частиц | | 665 |

Принятые обозначения в таблице 8:

- $[N]$, см^3 -количество зарегистрированных импульсов для данного элемента;
- $[\sum N]$, см^3 – суммарное количество зарегистрированных импульсов от всех частиц;
- $[\sum N_{\text{пр}}]$, см^3 – суммарное количество импульсов, зарегистрированных от одноэлементных «простых» частиц;

- [Кол-во составов «сложных» частиц] – количество «сложных» частиц одинакового состава;
- [Кол-во «сложных» частиц] – суммарное количество «сложных» частиц, состоящих из двух и более элементов.

Из таблицы 8 видно, что количество зарегистрированных импульсов между ГСО СОЧПИ-4 и «Имитация СОЧПИ-4» для большей части элементов различается на величину погрешности метода. Иными словами, образец «Имитация СОЧПИ-4», приготовленный на одноэлементных частицах максимально соответствует по количеству зарегистрированных импульсов от частиц реальных сплавов ГСО СОЧПИ-4.

В соответствии с описанным выше алгоритмом идентификации частицы, состоящей из двух и более элементов, меняли интервал совпадения фронтов импульсов [W]. Полученные результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты измерений количества зарегистрированных импульсов в пробах ГСО СОЧПИ-4 и «Имитация СОЧПИ-4» для разных значений интервала совпадений.

| Параметр | Образец | Размер интервала от начала импульса, мкс | | | | |
|--|----------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | исходный | 1000 | 500 | 300 | 100 |
| Кол-во частиц, состоящих из 2-х и более элементов, см ⁻³ | Имитация | 661 | 292 | 225 | 184 | 132 |
| | ГСО СОЧПИ–4 | 2530 | 2493 | 2480 | 2469 | 2429 |
| Кол-во частиц, состоящих из 1-го элемента, см ⁻³ | Имитация | 10109 | 10871 | 11012 | 11098 | 11222 |
| | ГСО СОЧПИ–4 | 5559 | 5766 | 5820 | 5892 | 6549 |
| Количество составов частиц, состоящих из 2-х и боле элементов | Имитация | 48 | 45 | 42 | 40 | 31 |
| | ГСО СОЧПИ–4 | 83 | 87 | 85 | 83 | 74 |

Таблица 9 показывает, что количество частиц, состоящих из двух и более элементов в пробе «Имитация СОЧПИ», при уменьшении интервала от начала импульса до 100 мкс снизилось с 661 см⁻³ до 132 см⁻³ т.е. приблизительно в 5

раз относительно исходного уровня. В пробе СОЧПИ-4 оно упало всего на 4%. Количество частиц, состоящих из одного элемента, в обоих пробах изменилось одинаково, увеличилось приблизительно на тысячу. Это говорит о том, что импульсы, бывшие ранее компонентами частицы, состоящей из нескольких элементов, высвободились и были зарегистрированы как одноэлементные частицы. В ГСО СОЧПИ-4 они, в основном, были компонентами из трех и более элементов, в имитации из двух элементов. При интервале совпадения 100 мкс произошло закономерное уменьшение количество составов частиц состоящих из двух и более элементов. Особенно это заметно для пробы «Имитация СОЧПИ-4». Этим объясняется неравенство изменения количества частиц, состоящих из двух и более элементов.

Введенная мера позволила более точно оценивать количество частиц, состоящих из нескольких элементов, уменьшив количество ложных совпадений в 5 раз.

Оценка достоверности измерения элементного состава металлических частиц СВЧ плазменным методом производилась методом электронного рентгеноспектрального микроанализа (ЭРСМА) на анализаторе JXA-8200.

При ЭРСМА из общего числа частиц, поступивших на исследование (наклеенных на скотч), по изображениям в обратно рассеянных и вторичных электронах выбирали все типы металлических частиц. Количество проанализированных частиц ограничено размером навески и временем изучения объекта на микроанализаторе JEOL8200 (Jeol Ltd., Япония).

Результаты, полученные методом ЭРСМА и на СВЧ плазменном анализаторе, приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты определения элементного состава при СВЧ плазменных и ЭРСМА измерениях.

| № | Элементный состав частиц | |
|---|--------------------------|--|
| | измеренных методом ЭРСМА | измеренных СВЧ плазменным анализатором |

| | | |
|----|----------------|-------------|
| 1 | Ni-Cu | Ni-Cu |
| 2 | Cr-Ni-Fe-Cu | Cr-Ni-Fe-Cu |
| 3 | Fe-Ni-Cu | Fe-Ni-Cu |
| 4 | Cr-Fe-Ni | Cr-Fe-Ni |
| 5 | Al-Ni | Al-Ni |
| 6 | Cr-Cu | Cr-Cu |
| 7 | Fe-Cu | Fe-Cu |
| 8 | Cr-Fe-Cu | Cr-Fe-Cu |
| 9 | Al-Mg-Fe | Al-Mg-Fe-Cu |
| 10 | Al-Mg-Ni-Cu | Al-Mg-Ni-Cu |
| 11 | Al-Fe-Mg-Ni-Cu | Al-Fe-Mg-Cu |
| 12 | Cr-Fe | Cr-Fe |

Таблица 10 показывает, что составы частиц, измеренные ЭРСМА полностью или частично совпадают с составами, полученными при СВЧ плазменных измерениях. Качественная близость полученных результатов, может свидетельствовать о достоверности определения элементного состава частиц изнашивания СВЧ плазменного метода, сопоставимой с точностью микрорентгеноспектрального метода, по крайней мере, на качественном уровне.

Таким образом:

1. показано, что при величине интервала совпадения от начала импульса 100 мкс, число случайных совпадений в реальном образце ГСО СОЧПИ-4 не превышает 4%. Это означает, что число достоверных измерений элементного состава от общего числа частиц составляет не менее 96%;

2. приведены сравнительные результаты микрорентгеноспектральных и СВЧ плазменных измерений в пробе, отобранной из маслосистемы авиационного двигателя с повреждением. Близость полученных результатов обоими методами показывает, что на качественном уровне чувствительности СВЧ плазменного метода достаточно для получения информации об элементном составе частиц изнашивания, на уровне микрорентгеноспектрального метода.

3.4. Выводы по главе

1. разработана и изготовлена новая конструкция УЗР, получен патент на полезную модель. Испытания нового распылителя жидких проб в составе СВЧ плазменного анализатора на протяжении нескольких лет показал высокую надежность на отказ не менее 2 500 часов, что сравнимо с наработкой на отказ СВЧ генератора плазмы;
2. экспериментально установлено, что максимум распределения капель золя по размерам приходится на 50 мкм при вязкости масла не более 12 мм²/с. Нагрев более вязких масел до температуры 85°С нивелирует влияние физических свойств масел различных марок на размер капель получаемого золя, максимум распределения капель золя по размерам приходится на 40 мкм;
3. предложен способ, позволивший оптимизировать достоверность измерения элементного состава металлических частиц. Эффективность разработанного способа проверена на искусственно приготовленных пробах с одноэлементными частицами;
4. показано, что при величине интервала совпадения в 100 мкс число случайных совпадений в реальном образце ГСО СОЧПИ-4 не превышает 4%. Это означает, что число достоверных измерений элементного состава от общего числа частиц составляет не менее 96%;
5. приведены сравнительные результаты микрорентгеноспектральных и СВЧ плазменных измерений в пробе, отобранной из маслосистемы авиационного двигателя с повреждением. Качественная близость полученных результатов обоими методами показывает, что при исследовании частиц изнашивания чувствительность СВЧ плазменного метода позволяет получать результаты по измерению элементного состава сравнимые с микрорентгеноспектральными методами.

Глава 4. Разработка экспериментальной методики диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2 при проведении приемосдаточных испытаний по результатам измерения параметров частиц изнашивания СВЧ плазменным методом.

Изменение износа деталей во времени в общем случае можно представить в виде модели, которая приводится во многих работах [2–4] (рис. 4.1).

В начальный период работы (участок 1), называемый периодом приработки, наблюдается довольно быстрый износ деталей. Продолжительность этого периода в разных источниках оценивается по-разному - от 6 до 100 часов, и обычно составляет 1,5-2% ресурса узла трения.

После приработки наступает период установившегося режима изнашивания, определяющий долговечность сопряжений, т.н. период нормальной эксплуатации ГТД (участок 2) На этом этапе измеренная величина массовой доли частиц изнашивания не меняется с наработкой, её величина является граничным значением, характеризующим нормальный износ деталей двигателя;

Третий период (участок 3) – период катастрофического изнашивания характеризует предельное состояние механизма и ограничивает ресурс - износ нарастает, повреждение прогрессирует, размер частиц увеличивается до 60 мкм.

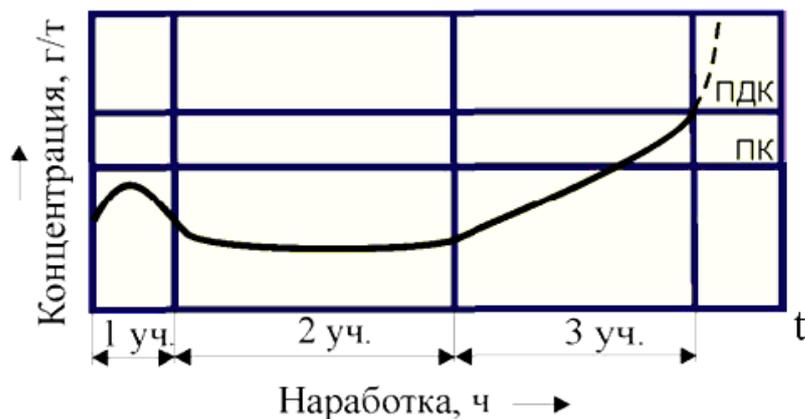


Рисунок 4.1 – Характер изменения содержания (массовой доли) частиц изнашивания в пробе масла при эксплуатации [4]: где ПК – повышенное содержание частиц в масле, при котором двигатель допускается эксплуатировать под «особым контролем»; ПДК – предельно допустимое содержание, при достижении которого двигатель подлежит отстранению от эксплуатации.

На стадии приработки (участок 1) могут наблюдаться частицы изнашивания в виде сфер, пластинок и чешуек размером 1–20 мкм. Максимальный размер частиц, образующихся в процессе приработки, достигает 100 мкм, но после окончания процесса приработки эти частицы оседают на фильтрах и уже не оказывают влияния на нормальное изнашивание, а при установившемся изнашивании (участок 2) – в виде пластинок и чешуек размером менее 15 мкм [57].

Исправность узлов маслосистемы несложно определить при установившемся, равновесном режиме изнашивания (участок кривой 2). В этом случае при использовании спектрального метода оценки имеется нормативная документация с контрольными значениями параметров. Если измеренные значения параметров не превышают контрольных – двигатель исправен.

Значительно сложнее оценить достоверность технического состояния двигателя по результатам спектральных измерений после проведения ПСИ (участок кривой 1). Дело в том, что двигатель на ПСИ находится сравнительно небольшое время и для части двигателей такого времени недостаточно для завершения процесса приработки.

Можно предполагать, что на данном этапе разброс по параметрам частиц изнашивания от двигателя к двигателю, в частности, по размерам частиц изнашивания может быть значительным. С целью подтверждения данного предположения после стендовых испытаний двигателей Д-30КП/КП-2 были отобраны пробы смывов с маслофильтров и для некоторых из них проведены измерения размеров металлических частиц с помощью

микрорентгеноспектрального анализатора JXA-8200. Методика выделения частиц и измерения размеров описана в работе [91].

На рисунках 4.2 – 4.4 показаны распределения металлических частиц изнашивания по размерам в пробах смывов двигателей Д-30КП/КП-2, прошедших ПСИ.

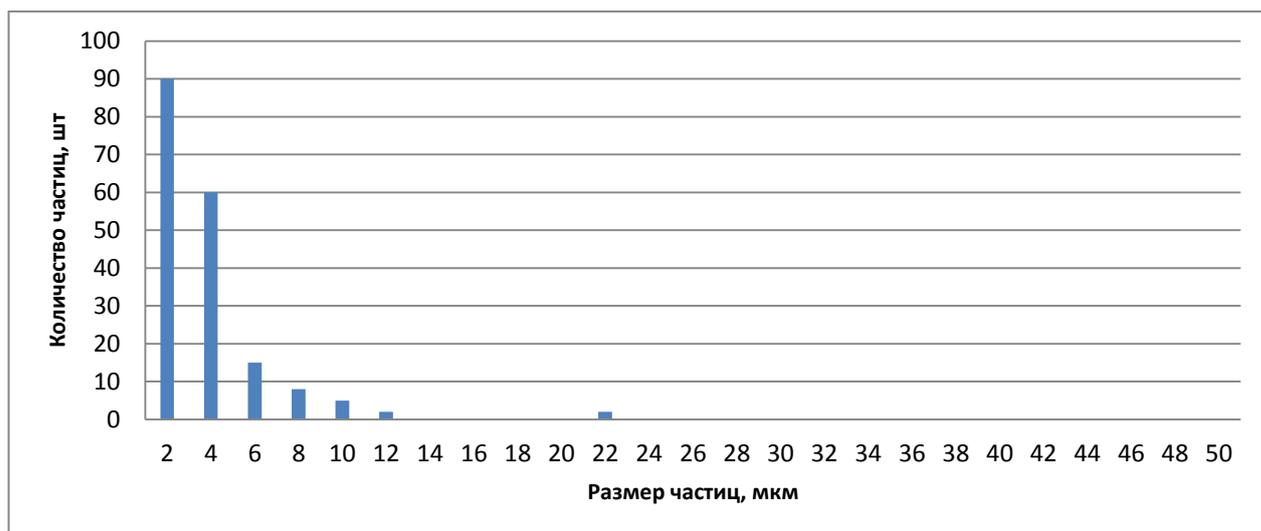


Рисунок 4.2 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 №190–041 после ПСИ, наработка – 5 часов 29 минут

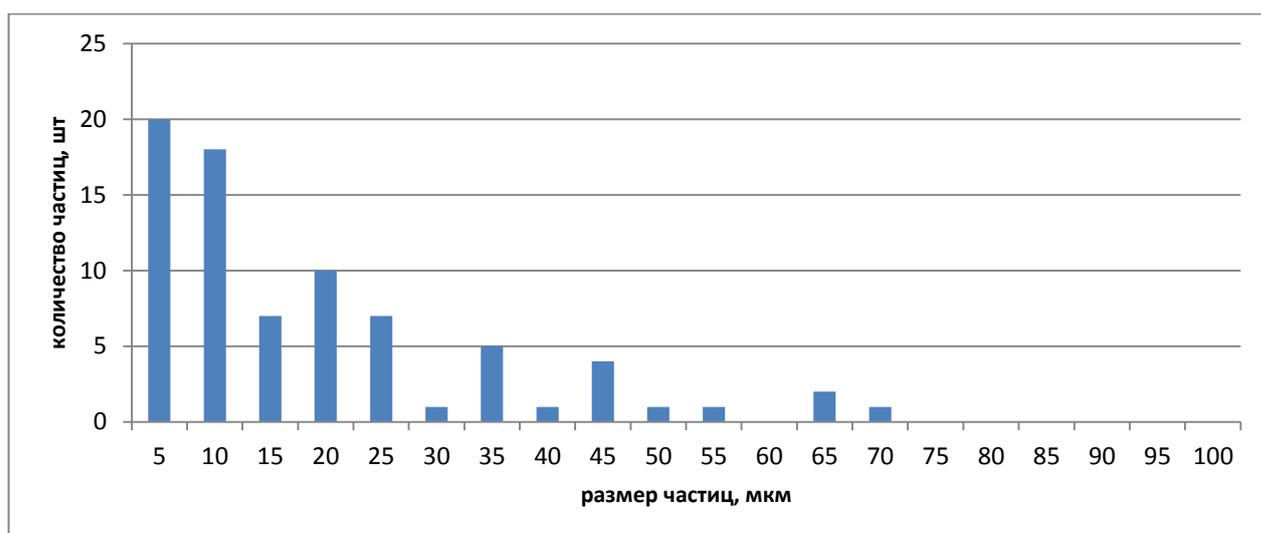


Рисунок 4.3 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 №187-021 после ПСИ, наработка – 7 часов 4 минуты.

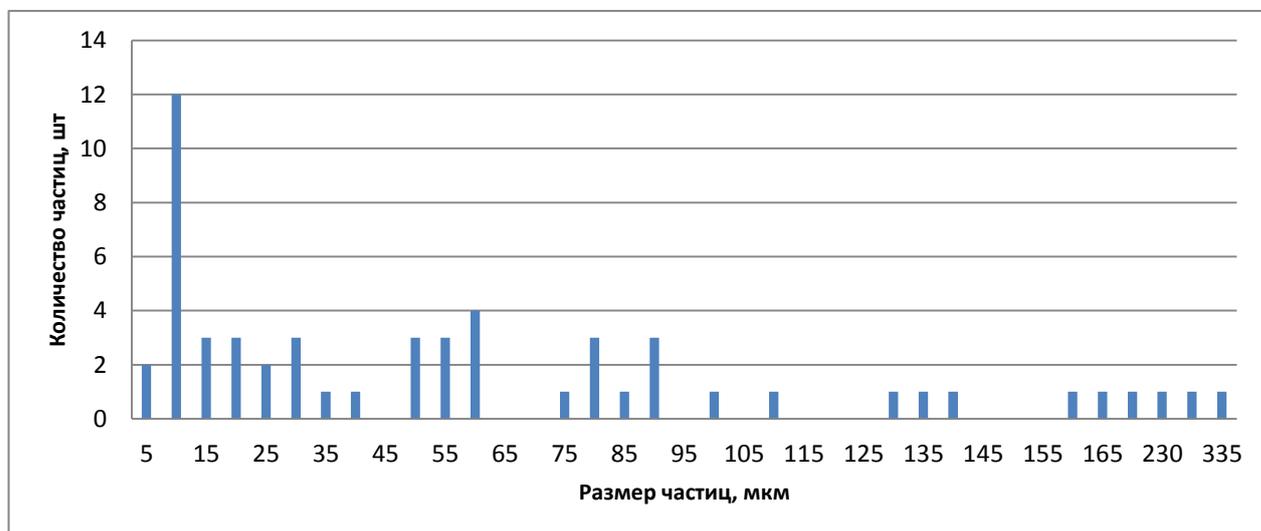


Рисунок 4.4 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 №42-085 после ПСИ, наработка – 6 часов 13 минут

Из рисунков 4.2 – 4.4 видно, что для рассматриваемых двигателей, при сравнительно близких значениях наработки, распределения частиц по размерам значительно различаются. Так, распределения на рисунках 4.2 – 4.3 имеют ярко выраженный максимум, в то время как для двигателя №42-085 (рис. 4.4) распределение оказалось фактически равномерным. При этом, правая сторона распределения для двигателя №190–041 ограничена размером частиц 22 мкм, в двигателе №187–021 правый «хвост» сдвинулся до 70 мкм, а в двигателе №42–085 распределение заканчивается при размерах частиц 335 мкм. Если принимать диагностическое решение по состоянию рассматриваемых двигателей только с учетом формы распределений, то, вероятнее всего, первые два двигателя можно рекомендовать к эксплуатации, для третьего - процесс приработки двигателя не завершён и для оценки его состояния необходимо соответствующее оборудование и методика диагностирования.

В разделе 1 отмечалось, что вследствие ограничений используемых спектральных методов проблема достоверной оценки состояния двигателей после ПСИ остается актуальной. Также отмечалось, что при проведении ПСИ, вследствие экономических и ресурсных соображений, двигатель находится на стенде, как правило, не более 10-15 часов. При этом, на данном этапе испытаний сложно отличить процесс приработки от начала повышенного износа. Перспективным для решения данной проблемы является использование СВЧ плазменного метода. Однако, для использования СВЧ плазменного метода в качестве контрольного при проведении ПСИ необходимо решение нескольких задач:

- оценить возможности использования СВЧ плазменного анализатора в качестве метода контроля технического состояния при проведении ПСИ двигателей Д-30-КП/КП-2;
- разработать методику измерения параметров частиц изнашивания по пробам масел и смывов с маслофильтров для двигателей Д30-КП/КП-2 при проведении ПСИ;
- разработать эталонные математические статистические модели исправных двигателей, прошедших ПСИ по результатам СВЧ плазменного анализа проб масла и смыва с МФС-30;
- разработать методики выявления двигателей с повышенными параметрами частиц изнашивания и возможными признаками повреждений;
- выработать рекомендации по снижению количества досрочно возвращаемых двигателей из эксплуатации.

4.1.Обоснование возможности использования СВЧ плазменного метода в качестве контрольного при проведении ПСИ

Ранее, для оценки технического состояния узлов, омываемых смазочным маслом авиационных двигателей, был использован СВЧ плазменный

(сцинтилляционный) метод анализа [8]. В процессе разработки и отработки методики оценки состояния двигателей Д-30-КП/КП-2/КУ/КУ-154 данным методом был набран большой статистический материал по параметрам частиц изнашивания для исправных двигателей. По полученным результатам построены математические эталонные статистические модели исправных двигателей для проб масла и смыва с маслофильтра, с помощью которых оценивалось техническое состояние двигателей [8]. Достоверность выявления повреждений в двигателях по результатам СВЧ плазменных измерений с точностью до узла составила не менее 90% [36]. Высокая достоверность диагностирования достигнута за счет высокой информативности метода и использования в качестве дополнительного источника информации о процессах изнашивания пробы смыва с основного маслофильтра. Попытки использования ранее разработанных моделей для оценки состояния двигателей после проведения ПСИ показали, что не менее 90% двигателей попадали в разряд «особый контроль», либо «неисправный».

Для достижения сформулированных выше задач использовался достаточно представительный массив проб. На анализ поступили пробы с передней коробки приводов (ПКП) в количестве 83 шт, пробы с задней коробки приводов (ЗКП) - 83 шт. Были также получены пробы смывов с основного маслофильтра МФС-30 в количестве 81 шт

Все пробы отобраны с двигателей Д-30КП/КП-2, прошедших капитальный ремонт. Пробы с ЗКП и ПКП представляли собой пробы масла МС-8П, содержащие частицы изнашивания. Пробы с МФС-30 – смыв в нефрас. Нарботка двигателей после ПСИ составляла не более 15 часов. Двигатели после ПСИ были направлены в эксплуатацию, а набранный массив проб на анализ. Ранее техническое состояние системы смазки двигателей после ПСИ по результатам СВЧ плазменных измерений не оценивалось.

Измерения параметров частиц изнашивания проводились на СВЧ плазменном (сцинтилляционном) анализаторе САМ-ДТ-01-2 [92]. Для градуирования анализатора использовался ГСО СОЧПИ, изготовленный на

основе натуральных частиц изнашивания и СО Conostan, изготовленный на основе металлоорганической примеси.

По результатам анализа обнаружено, что в представленных пробах равновесное количество частиц изнашивания, циркулирующих в маслосистеме, от двигателя к двигателю может различаться более чем на порядок. Так, в двигателе №489–064 суммарное количество частиц по всем элементам в ПКП составило $11\,596\text{ см}^{-3}$, а в двигателе №21–650 всего 667 см^{-3} (см. табл. 11).

Таблица 11 – Параметры частиц изнашивания для некоторых из исследованных двигателей

| Приёмосдаточные испытания (ПСИ) | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|-----------------------------|-------------|-------------|-----------------------------|-------------|-------------|-----------------------------|
| № | № двиг | ПКП | | | ЗКП | | | МФС |
| | | $\Sigma N, \text{ см}^{-3}$ | C (Fe), г/г | C (Cu) ,г/г | $\Sigma N, \text{ см}^{-3}$ | C (Fe) ,г/г | C (Cu) ,г/г | $\Sigma N, \text{ см}^{-3}$ |
| 1 | 489-064 | 11596 | 1,52 | 2,23 | 8989 | 1,37 | 2,00 | 1342 |
| 2 | 37-717 | 1352 | 0,93 | 0,84 | 1398 | 0,89 | 0,87 | 15385 |
| 3 | 21-650 | 667 | 0,80 | 0,47 | 664 | 0,58 | 0,46 | 2503 |
| 4 | 286-078 | 910 | 0,54 | 0,87 | 545 | 0,36 | 0,73 | 0 |
| 5 | 190-041 | 3647 | 2,64 | 1,5 | 3045 | 2,15 | 1,33 | 4864 |

Где: ΣN – суммарное количество частиц по всем элементам, зарегистрированное в пробе, C (Fe) и C (Cu) – массовая доля элемента, измеренная в пробе.

В двигателе №489–064, несмотря на большое суммарное количество частиц в ПКП и ЗКП ($\Sigma N_{\text{ПКП}}=11\,569\text{ см}^{-3}$, $\Sigma N_{\text{ЗКП}}=8\,989\text{ см}^{-3}$) маслофильтром МФС-30 зарегистрировано сравнительно малое количество частиц ($\Sigma N_{\text{МФС-30}}=1\,342\text{ см}^{-3}$). Это означает, что размер частиц изнашивания значительно меньше размеров ячеек маслофильтра и маслофильтр улавливает небольшую долю частиц.

Имеется двигатель, например, №37–717, где в ПКП и ЗКП суммарное количество частиц по всем элементам составило $\Sigma N_{\text{ПКП}}=1\,352\text{ см}^{-3}$ и $\Sigma N_{\text{ЗКП}}=1\,398\text{ см}^{-3}$, а маслофильтром уловлено $\Sigma N_{\text{МФС-30}}=15\,385\text{ см}^{-3}$, что

свидетельствует о наличии в маслосистеме двигателя сравнительно крупных частиц и большую часть таких частиц улавливает маслофильтр.

Таким образом, результаты исследования проб с 83 двигателей, поступивших на ПСИ после капитального ремонта, показали большой разброс по параметрам частиц. Так, максимальный размер частиц от двигателя к двигателю мог изменяться от 20 мкм до 335 мкм, количество частиц менялось более чем на порядок. Величина массовой доли железа различалась более 5 раз (см. двигатели ПКП №286–078, №190–041). Различие по меди меньше и составило 2-3 раза. Вывод – аналитические возможности СВЧ плазменного (сцинтилляционного) метода позволяют использовать данный метод для выбраковки двигателей после проведения ПСИ.

4.2. Статистическая эталонная модель исправного двигателя Д–30КП/КП–2, прошедшего приёмосдаточные испытания (ПСИ)

При построении статистической модели исправного двигателя, прошедшего ПСИ, данные СВЧ плазменного анализа проб масла и смывов проанализированы на наличие выбросов и аномальных результатов. Для этого применялась стандартная статистическая процедура построения диаграммы размаха изменения данных с выделением медианы (50%), внутренних и внешних границ, вычисленных на основе квартилей (25%, 75%). Анализ проводился с помощью стандартного статистического пакета STATISTICA (Version 10, Start Soft Inc., США). Статистические модели строились отдельно для проб масла с ПКП и ЗКП и проб смывов с маслофильтров.

Из всего количества проб масла (166) только одна проба №10070 с ПКП двигателя №489–064 по параметру «количество составов сложных частиц» была определена как экстремальный выброс и исключена из выборки.

По пробам смывов выяснено следующее.

Предыдущий опыт работы показал, что в исправных двигателях Д–30КП/КП–2 размер частиц не превышает 70 мкм. В двигателе №189–021 после ПСИ максимальный размер частиц составил 145 мкм, поэтому данный двигатель был исключен из общей выборки при построении статистической модели исправного двигателя. Были обнаружены еще 2 двигателя, максимальный размер частиц которых превышал 100 мкм: для двигателя №189–031 максимальный размер составил 174 мкм, для двигателя №42–085 максимальный размер составил 335 мкм.

Таким образом, вместо исходного списка из 247 проб для построения эталонных статистических моделей двигателей после ПСИ использовалось 165 проб масел, 78 проб смывов с МФС-30 (исключены пробы двигателей №189-021, №189-031, №42-085).

По результатам измерений параметров частиц были построены эталонные статистические модели для ПКП, ЗКП (см. табл. 12) и для смыва с маслофильтра. Ниже, в таблице 13 в качестве иллюстрации, приведена статистическая модель по 78 пробам смыва с маслофильтра МФС-30.

Таблица 12 – Статистическая эталонная модель исправного двигателя Д–30КП/КП–2 после ПСИ, построенная по пробам масла из ПКП и ЗКП

| Параметр | Состав | \bar{x} | $\bar{x} + 2\sigma$ | $\bar{x} + 3\sigma$ |
|---|--------|-----------|---------------------|---------------------|
| [N, см ⁻³] – Количество частиц износа | Al- | 118,4 | 431,4 | 823,5 |
| | Cr- | 32,5 | 98,7 | 171,9 |
| | Ni- | 8,3 | 33,3 | 66,7 |
| | Mg- | 80,7 | 412,3 | 932,1 |
| | Fe- | 170,0 | 459,5 | 755,5 |
| | Cu- | 1160,2 | 4238,1 | 8100,2 |
| | Ag- | 151,8 | 711,5 | 1540,5 |
| [N _{общ} , см ⁻³] – Количество простых частиц износа | V- | 0,6 | 2,1 | 4,0 |
| | Al- | 110,6 | 404,2 | 772,4 |
| | Cr- | 13,7 | 40,5 | 69,6 |
| | Ni- | 3,6 | 15,2 | 31,2 |
| | Mg- | 61,7 | 358,7 | 864,7 |
| Fe- | 144,6 | 390,6 | 642,1 | |

| | | | | |
|---|-----------|--------|--------|--------|
| | Cu- | 1132,5 | 4142,0 | 7921,4 |
| | Ag- | 143,8 | 666,2 | 1433,7 |
| | V- | 1,4 | 4,0 | 6,7 |
| [D, мкм] – Размер частиц износа | Al- | 9,3 | 17,5 | 23,9 |
| | Cr- | 4,8 | 8,4 | 11,2 |
| | Ni- | 6,8 | 16,7 | 26,2 |
| | Mg- | 4,9 | 8,2 | 10,6 |
| | Fe- | 5,8 | 9,5 | 12,2 |
| | Cu- | 2,9 | 3,8 | 4,4 |
| | Ag- | 4,5 | 7,2 | 9,2 |
| [C _p , г/г] – Концентрация в растворе | Mg- | 0,2 | 0,6 | 1,1 |
| | Fe- | 0,8 | 2,3 | 3,9 |
| | Cu- | 1,0 | 2,5 | 4,0 |
| | Ag- | 0,0 | 0,9 | 4,0 |
| [C _ч , см ⁻³] – Концентрация в частицах износа | Al- | 0,1 | 1,3 | 3,8 |
| | Cr- | 0,0 | 0,1 | 0,3 |
| | Ni- | 0,0 | 0,3 | 1,3 |
| | Mg- | 0,0 | 0,1 | 0,2 |
| | Fe- | 0,1 | 0,7 | 1,7 |
| | Cu- | 0,1 | 0,5 | 0,9 |
| | Ag- | 0,1 | 0,4 | 0,9 |
| [N _{сл} , см ⁻³] – Количество сложных частиц | Al-Cr- | 1,2 | 2,7 | 4,1 |
| | Al-Ni- | 1,1 | 1,6 | 2,0 |
| | Cr-Ni- | 1,3 | 2,6 | 3,7 |
| | Al-Cr-Ni- | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| | Al-Mg- | 1,4 | 3,4 | 5,3 |
| | Cr-Mg- | 5,9 | 24,5 | 50,2 |
| | Al-Cr-Mg- | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| | Ni-Mg- | 1,1 | 1,9 | 2,4 |
| | Cr-Ni-Fe- | 1,8 | 4,2 | 6,4 |
| [V _{общ}] – Параметр износа | | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| [G] – Количество составов | | 23,0 | 36,3 | 42,9 |

Где: \bar{x} – среднее значение параметра, σ – стандартное отклонение;

Таблица 13 – Статистическая эталонная модель исправного двигателя Д–30КП/КП–2 после ПСИ, построенная по пробам смыва с маслофильтра МФС-30

| Параметр | Состав | \bar{x} | $\bar{x} + 2\sigma$ | $\bar{x} + 3\sigma$ |
|----------|--------|-----------|---------------------|---------------------|
|----------|--------|-----------|---------------------|---------------------|

| | | | | |
|---|-----------|--------|--------|--------|
| [Vобщ] - Параметр износа | | 0,16 | 0,31 | 0,45 |
| [Vэл] – Элементный параметр износа | Al- | 0,15 | 0,37 | 0,63 |
| | Cr- | 1,89 | 3,68 | 5,31 |
| | Ni- | 0,92 | 1,96 | 2,99 |
| | Mg- | 0,33 | 0,67 | 1,00 |
| | Fe- | 0,37 | 0,78 | 1,17 |
| | Cu- | 0,09 | 0,25 | 0,44 |
| | Ag- | 0,23 | 0,62 | 1,08 |
| | V- | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| [G] - Количество составов | | 45,00 | 72,80 | 86,70 |
| [Ro] – Рейтинг общий изнашивания частиц | Al- | 214,94 | 520,22 | 753,79 |
| | Cr- | 19,14 | 32,80 | 43,61 |
| | Ni- | 12,17 | 24,22 | 35,31 |
| | Mg- | 129,83 | 286,03 | 415,93 |
| | Fe- | 104,09 | 218,73 | 314,62 |
| | Cu- | 501,62 | 790,68 | 935,04 |
| | Ag- | 18,21 | 55,20 | 104,81 |
| | V- | 0,17 | 0,64 | 1,48 |
| [Rпр] - Рейтинг одноэлементных частиц изнашивания («простые» частицы) | Al- | 192,30 | 488,48 | 730,07 |
| | Cr- | 7,11 | 14,47 | 21,39 |
| | Ni- | 6,66 | 14,96 | 23,47 |
| | Mg- | 100,11 | 233,38 | 354,55 |
| | Fe- | 78,50 | 180,21 | 274,94 |
| | Cu- | 463,79 | 763,27 | 917,50 |
| | Ag- | 15,19 | 47,06 | 91,46 |
| | V- | 0,40 | 1,35 | 2,98 |
| [Rсл] - Рейтинг частиц, состоящих из двух и более элементов («сложные частицы») | Al-Cu- | 11,56 | 29,71 | 50,28 |
| | Mg-Cu- | 9,74 | 26,50 | 47,17 |
| | Fe-Cu- | 6,08 | 16,86 | 30,32 |
| | Al-Mg- | 4,24 | 13,97 | 28,62 |
| | Cr-Fe- | 3,38 | 7,11 | 10,76 |
| | Cu-Ag- | 1,37 | 4,83 | 10,39 |
| | Cr-Mg- | 2,25 | 5,85 | 10,17 |
| | Mg-Fe-Cu- | 1,72 | 5,17 | 9,91 |
| | Cr-Ni-Fe- | 1,84 | 4,68 | 8,03 |
| | Ni-Cu- | 0,93 | 2,43 | 4,20 |
| | Ni-Fe- | 0,84 | 2,25 | 4,02 |
| | Cr-Ni- | 0,68 | 1,73 | 2,98 |

Где: \bar{x} – среднее значение параметра, σ – стандартное отклонение;

По полученной модели были выявлены еще 8 двигателей, параметры которых превышали значения $(\bar{x} + 3\sigma)$. Количество двигателей, превысивших значение $(\bar{x} + 2\sigma)$ составило 15. Таким образом, согласно разработанной модели количество двигателей, превысивших параметр $(\bar{x} + 3\sigma)$ составило 11.

Из представленных данных видно, что двигатели после ПСИ по массовой доле и размерам частиц могут существенно различаться. Поэтому в построение эталонной модели весь список исследованных двигателей не включался. Найдены критерии выбраковки двигателей с худшими характеристиками, которые исключены из выборки, а оставшийся список использовался для построения статистической эталонной модели исправного двигателя.

4.3. Обсуждение результатов

Превышение параметра(ов) уровня $(\bar{x} + 3\sigma)$ с формальной точки зрения означает, что с вероятностью близкой к 99% двигатель имеет повреждение, либо не завершён процесс приработки. Однако к двигателям, вышедшим по параметрам за уровень $(\bar{x} + 3\sigma)$ при проведении ПСИ должен быть особый подход, заключающийся в следующем. При принятии диагностического решения должен учитываться «вес» параметров, имеющих превышения. «Вес» параметра определяют, как правило, «сложные» частицы, типа Fe-Cu, Cu-Ag, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, Al-Cu и т.д. Чем больше зарегистрировано таких частиц, тем хуже состояние двигателя. Также надёжно установлено, что регистрация небольшого числа одноэлементных частиц ванадия и (либо) частиц сплава с ванадием, типа Fe-Cr-Ni-V в количестве 3-5 штук с большой вероятностью свидетельствует о начале повреждения. При обнаружении одноэлементных частиц, типа Al, Mg, Cu связи с ухудшением технического состояния двигателя не выявлено.

В таблице 14 приведены результаты измерений пробы масла с ПКП, параметры которой вышли за $(\bar{x} + 3\sigma)$ Как выше отмечалось, данная проба

оказалась единственной среди 166 исследованных проб масел, отобранных с коробок приводов, где параметры частиц превысили контрольное значение ($\bar{x} + 3\sigma$).

Таблица 14 – Параметры частиц изнашивания в пробе масла с ПКП двигателя №489–064, превысившие граничное значение ($\bar{x} + 3\sigma$) параметра [Нсл.].

| № двиг. | Состав | Измеренное значение | Контрольное значение $\bar{x} + 3\sigma$ |
|---------|-------------|---------------------|--|
| 489-064 | Cr-Mg-Fe | 1,50 | 1,40 |
| | Al-Cu | 41,00 | 34,22 |
| | Cr-Cu | 6,00 | 5,48 |
| | Ni-Cu | 4,67 | 4,04 |
| | Cr-Mg-Cu | 3,33 | 3,05 |
| | Al-Mg-Fe-Cu | 3,00 | 2,61 |
| | Mg-Ag | 3,67 | 3,41 |
| | Fe-Cu-Ag | 2,00 | 1,93 |

Из таблицы 14 видно, что в пробе масла с ПКП зарегистрировано достаточно большое количество «сложных» частиц. При этом, для данного двигателя в пробе смыва с МФС превышений контрольных значений параметров частиц не выявлено. Это означает отсутствие в маслосистеме двигателя частиц размером более 70 мкм (размер ячеек фильтра МФС-30 составляет 70-75 мкм).

Элементный состав показанных частиц в таблице свидетельствует об отсутствии частиц «большого веса», характеризующих повышенный износ тел качения и обойм подшипников, типа Cr-Ni-Fe, Cr-Ni-Fe-V и т.д. Зарегистрированные частицы типа Fe-Cu-Ag, Al-Cu, как правило, характеризуют износ сепараторов, а состав Ni-Cu- касание гребешков лабиринтного уплотнения. Сравнивая в таблице контрольное значение параметра с уровнем измеренного видно незначительное их различие. Существенное различие наблюдается только для параметра Al-Cu,

характеризующего повышенный износ сепаратора подшипника (ов). Поэтому с большой долей уверенности можно предполагать, что элементный состав частиц и уровень превышений **не свидетельствуют** о признаках начала развития повреждения. В данном случае повышенные параметры частиц объясняются процессом приработки (рис. 4.5).

I. Параметры частиц износа.

| Элемент | N, смЗ | Nпр, смЗ | Ср, г/т | Сч, г/т | С, г/т | D, мкм |
|---------|---------|----------|---------|---------|--------|--------|
| Al | 683 | 611,33 | 0 | 0,28 | 0,28 | 6,57 |
| Cr | 134 | 58 | 1,35 | 0,02 | 1,37 | 3,47 |
| Ni | 59 | 25,67 | 0,17 | 0,05 | 0,23 | 5,15 |
| Mg | 757,67 | 626,33 | 0,24 | 0,04 | 0,28 | 3,83 |
| Fe | 473,67 | 362 | 1,09 | 0,29 | 1,37 | 5,24 |
| Cu | 6314,33 | 6069 | 1,67 | 0,33 | 2 | 2,24 |
| Ag | 566,67 | 497,67 | 0,17 | 0,07 | 0,23 | 2,76 |
| V | 0,33 | | 0,04 | 0 | 0,04 | 0 |

II. Состав и количество сложных частиц

Количество составов сложных частиц: 47

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,09

| Состав | Количество |
|-----------|------------|
| -Cu-Ag | 49 |
| -Mg-Cu | 46,33 |
| -Al-Cu | 41 |
| -Cr-Mg | 40,33 |
| -Fe-Cu | 38,33 |
| -Ni-Fe | 15,67 |
| -Cr-Fe | 10,33 |
| -Mg-Fe | 8,67 |
| -Cr-Cu | 6 |
| -Ni-Cu | 4,67 |
| -Al-Mg | 4 |
| -Cr-Ni-Fe | 3,67 |
| -Mg-Ag | 3,67 |
| -Al-Ag | 3,33 |
| -Cr-Mg-Cu | 3,33 |
| -Cr-Fe-Cu | 2,67 |
| -Fe-Ag | 2,67 |

где: серым фоном в протоколе выделен уровень превышений ($\bar{x} + 2\sigma$), серым в жирной рамке - ($\bar{x} + 3\sigma$).

Рисунок 4.5 – Фрагмент протокола СВЧ плазменных измерений пробы масла из двигателя №489–064 после ПСИ, наработка двигателя 7 ч 16 мин

После ПСИ данный двигатель отправлен в эксплуатирующую организацию. Через 100 часов наработки была вновь отобрана проба на анализ (рис.4.6). Результаты анализа показали норму, что подтвердило предварительно сделанные выше выводы - повышенные параметры частиц связаны с приработкой узлов и агрегатов двигателя, омываемых смазочным маслом.

I. Параметры частиц износа.

| Элемент | N, см3 | Nпр, см3 | Ср, г/т | Сч, г/т | С, г/т | D, мкм |
|---------|--------|----------|---------|---------|--------|--------|
| Al | 18,5 | 16 | 0 | 0,01 | 0,01 | 7,45 |
| Cr | 32,5 | 13 | 0 | 0,04 | 0,04 | 6,78 |
| Ni | 5,5 | 2,5 | 0 | 0,02 | 0,02 | 7,01 |
| Mg | 85,5 | 48,5 | 0,23 | 0,01 | 0,24 | 4,33 |
| Fe | 49,5 | 31 | 0 | 0,04 | 0,04 | 5,69 |
| Cu | 489 | 446,5 | 0,25 | 0,04 | 0,29 | 2,49 |
| Ag | 158,5 | 150,5 | 0 | 0,02 | 0,02 | 2,6 |
| V | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 |

II. Состав и количество сложных частиц.

Количество составов сложных частиц: 22

Отношение количества сложных частиц к количеству простых: 0,19

| Состав | Количество |
|--------------------|------------|
| -Mg-Cu | 24 |
| -Cr-Fe | 4 |
| -Cu-Ag | 4 |
| -Cr-Mg | 3,5 |
| -Cr-Mg-Fe-Cu | 3 |
| -Cr-Mg-Fe-Cu-Ag | 2 |
| -Fe-Cu | 2 |
| -Mg-Fe-Cu | 1,5 |
| -Al-Cr-Fe | 1 |
| -Cr-Fe-Cu | 1 |
| -Cr-Mg-Cu | 1 |
| -Cr-Ni-Fe-Cu | 1 |
| -Al-Cr-Mg-Fe-Cu-Ag | 0,5 |
| -Al-Cr-Mg | 0,5 |
| -Al-Cr-Ni-Fe | 0,5 |
| -Cr-Cu | 0,5 |
| -Cr-Fe-Cu-Ag | 0,5 |

Рисунок 4.6 – Фрагмент протокола СВЧ плазменных измерений пробы масла из двигателя №489–064 из эксплуатации, наработка ППР: 105 ч

Анализ проб смывов с МФС-30 позволил выявить 11 двигателей с параметрами, превышающими значение $(\bar{x} + 3\sigma)$. Список двигателей с повышенными параметрами приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Список двигателей и результаты измерений параметров частиц в пробах смывов с МФС-30, превысивших границу ($\bar{x} + 3\sigma$)

| № п/п | № двигателя | № двигателя | Превышение $\bar{x} + 3\sigma$ |
|-------|-------------|---|---|
| 1 | 37-729 | В эксплуатации. наработка на 07.11.2023 СНЭ/ППР 4059/2078 часов, 2276/1017 циклов. ИНЦИДЕНТ. 17.07.2023. При осмотре двигателя на земле обнаружено повреждение шлицов вала насоса ДЦН44С-ПЗТ и приводного валика на задней коробке приводов. Специалистами ИАС выполнена работа по замене насоса ДЦН44С-ПЗТ и приводного валика на задней коробке приводов. Проведено опробование двигателя по полному графику, замечаний нет. Двигатель допущен к подконтрольной эксплуатации. | Cr-Fe Cr-Mg-Fe Cr-Mg-Cu Ni-Mg-Cu Al-Fe-Cu Cr-Ni-Fe-Cu Mg-Fe-Cu Al-Mg-Fe-Cu Cr-Mg-Fe-Cu Al-Cr-Mg-Fe-Cu Al-Mg-Cu-Ag |
| 2 | 186-092 | Снят в ремонт при ППР 321 час по забоинам лопаток. Наработка СНЭ/ППР 4466/321 часов, 2043/222 циклов. На 1.12.2023 на завод не предъявлен | Ag Cr-Ni Cr-Ni-Fe-Al Cr-Ni- Fe-Mg Cr-Fe-Cu |
| 3 | 115-061 | В резерве. Снят с крыла 23.02.2020 по замене лопаток Отремонтирован 17.10.2021 Наработка на 17.10.2021 СНЭ/ППР 1999/0 часов, 966/0 циклов | Ni |
| 4 | 40-857 | Ремонт локальный 12.09.2022 08.08.2023 снят на замену лопаток 1 ст. КНД при наработке СНЭ/ППР 3108/1859 часов, 1653/856 циклов | Fe-Cu |
| 5 | 189-031 | В резерве Наработка на 25.12.2019 СНЭ/ППР 8171/971 часов, 5192/486 циклов | Cr Al-Cr Al- Ni |
| 6 | 28-655 | Находится в эксплуатации Наработка на 03.11.2023 СНЭ/ППР 4349/2438 часов 2506/1322 циклов | Mg |
| 7 | 32-039 | Находится в эксплуатации Наработка на 07.11.2023 СНЭ/ППР 5740/ 2084 часов 2794/977 циклов | Fe |
| 8 | 288-072 | Находится в эксплуатации Наработка на 07.11.2023 СНЭ/ППР 3993/1076 часов, 1989/333 циклов | Cr |
| 9 | 31-717 | 06.10.2022 снят по выработке ресурса при наработке СНЭ/ППР 3011/2021 часов, 1700/1037 циклов | Ag Al-Mg-Cu-Ni Fe-Ag |
| 10 | 42-085 | Находится в эксплуатации Наработка на 07.11.2023 СНЭ/ППР 2676/1175 часов, 1864/732 циклов | Fe-Cr Mg-Cu |

| | | | |
|----|---------|---|-------------|
| 11 | 189-021 | При ППР 403 час. повышенные значения контрольного сигнала по ИВУ-1М ИНЦИДЕНТ , при наработке ППР 403 часа повреждение межвального роликоподшипника. После ремонта в эксплуатации. Наработка на 07.11.2023 СНЭ/ППР 5613/2003 часов, 2756/1173 циклов | Cr Al-Cu |
|----|---------|---|-------------|

В таблице 15 показан двигатель №37–729, в котором количество превысивших параметров значение ($\bar{x} + 3\sigma$) в пробе смыва с МФС-30 немногим отличается от двигателя №489–064, представленного в таблице 14. Однако «вес» параметров в двигателе №37–729 отличается в большую сторону от двигателя №489–064. Наблюдаются в достаточно большом количестве частицы, связанные с хромом, зарегистрированы частицы Cr-Ni-Fe-Cu, зарегистрирован состав Fe-Cu, связанный с другими элементами. При этом, состав Cr-Ni-Fe-Cu может с большой вероятностью свидетельствовать о начале повышенного износа шлицевого соединения омедненного вала. В таких случаях эксплуатанту необходимо рекомендовать при ближайшем ТО отобрать на анализ пробы масел и смыва и по результатам анализа принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации двигателя. В данном случае пробы были отобраны при ППР 446 часов с ПКП, ЗКП и МФС-30.

В пробе с МФС-30 для двигателя №37–729 при ППР 446 часов количество превышений по сравнению с результатом анализа после ПСИ существенно снизилось, наблюдались превышения за границу ($\bar{x} + 2\sigma$) только для магния и хрома, «сложных» частиц Cr-Mg, Cr-Fe. Однако при данной наработке выявлены превышения в ЗКП по массовой доле Mg, Fe и Cu, которые во время ПСИ не наблюдались. При этом, превышения наблюдались для растворенной фазы металлов (частиц размером менее 2 мкм), что характерно для повышенного износа по типу истирания. К сожалению, в дальнейшей пробы на анализ не поступали и при ППР 2078 час произошёл инцидент. Обнаружено повреждение шлицов вала насоса ДЦН44С-ПЗТ и приводного валика на задней коробке приводов. Отметим, что износ по типу истирания

происходит достаточно медленно (опыт показал, что критическое состояния узла возникает через несколько сотен часов) и при своевременном отборе проб на анализ имелась возможность инцидент предотвратить.

При разработке статистической эталонной модели двигатель №189–021 не вошёл в выборку исправных двигателей, поскольку по результатам СВЧ плазменных измерений наблюдались превышения по Cr и Al-Cu. В этой связи проба смыва дополнительно была исследована на микрорентгеноспектральном анализаторе. По полученным результатам построено распределение частиц по размерам (рис. 4.7)

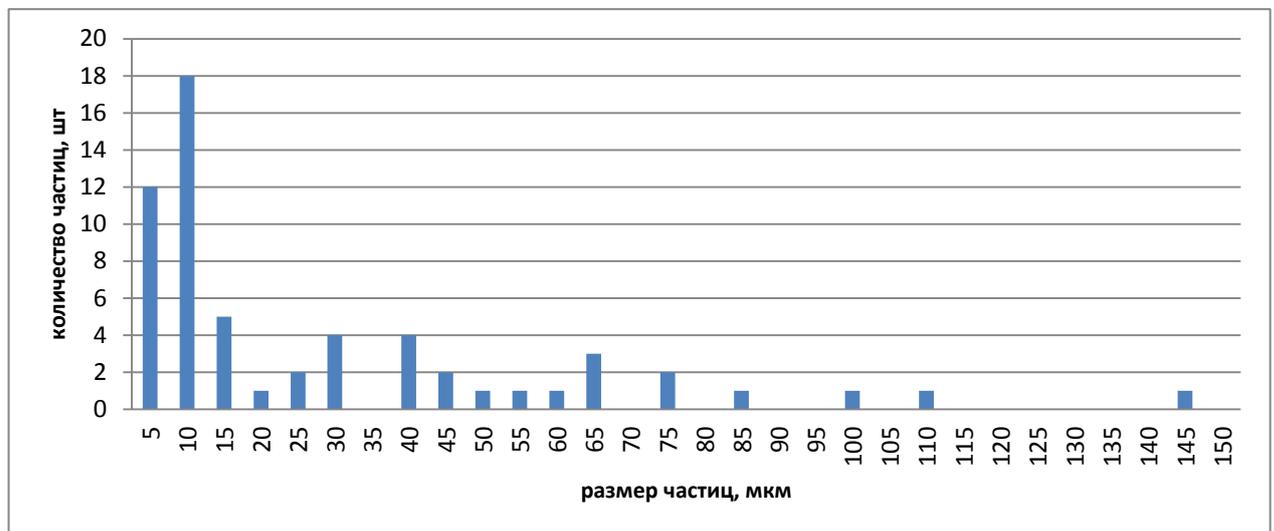


Рисунок 4.7 – Диаграмма распределения частиц по размерам №189–021 после приёмосдаточных испытаний (ПСИ).

Из рисунка 4.7 видно, что максимум распределения частиц по размерам приходится на диапазон 5-15 мкм, а правый «хвост» ограничен размером 145 мкм. Следующая проба была отобрана и проанализирована при ППР 403 часа.

Сравнивая результаты СВЧ плазменного анализа после проведения ПСИ (см. табл. 15) и при наработке ППР 403 часа (см. табл. 16) видно, что они существенно различаются. Если при ПСИ наблюдалось превышение только для Cr и Al-Cu, то при ППР 403 часа фиксировались превышения для Cr, Fe, «сложных» частиц Cr-Fe, Fe-Ag, Cr-Fe-Cu, Cr-Fe-Cu-Ag, а также зарегистрировано большое число частиц (39 частиц), связанных с ванадием,

превышающих уровень $(\bar{x}+3\sigma)$. При таких параметрах двигатель однозначно подлежит съёму с крыла.

Таблица 16 – Протокол СВЧ плазменных измерений двигателя №189-021 при наработке ППР 403 часа

Протокол № сн-10435
сцинтилляционного анализа частиц износа

Анализатор: САМ-ДТ-01-2 №002
 Двигатель: д30кп2 №: 189021
 Номер борта: 0 Номер силовой установки: 0
 Организация: ПАО"НПО"Сатурн"
 Нарботка ППР (часы): 403 (полетные циклы): 177
 Нарботка 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 частицизноса.

| Элемент | N, см3 | RO | 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 |
| -Cr-Ni-Fe-Cu-Ag-V | 16 | 3,33 |
| -Fe-Cu-Ag | 14 | 2,92 |
| -Mg-Fe-Cu | 13,5 | 2,81 |
| -Cr-Ni-Fe | 11,5 | 2,4 |
| -Cr-Mg-Fe-Cu-Ag | 10 | 2,08 |
| -Cr-Mg-Fe-Cu | 10 | 2,08 |

Где: серым фоном в протоколе выделен уровень превышений $(\bar{x} + 2\sigma)$, серым в жирной рамке- $(\bar{x} + 3\sigma)$.

Проведённые измерения по ИВУ-1М также показали повышенные значения контрольного сигнала. Двигатель был снят с крыла по рекламации, отремонтирован и в 2023 году находился в эксплуатации.

Среди 11 двигателей, в которых параметры вышли при проведении ПСИ за уровень $(\bar{x} + 3\sigma)$ имеется еще один двигатель №186–092, где была повторно отобрана проба на анализ при наработке ППР 161 час. Зарегистрированные после ПСИ частицы, типа Ag, Cr-Ni, Cr-Ni-Fe-Al, Cr-Ni-Fe-Mg, Cr-Fe-Cu обладают достаточно большим диагностическим «весом». При ППР 161 час уровень превышений снизился до $(\bar{x} + 2\sigma)$, снизился «вес» параметров - при данной наработке не обнаружены частицы Ag, частицы, связанные с Cr-Ni-Fe. Вероятней всего большой «вес» параметров при ПСИ объясняется процессом приработки. В дальнейшем двигатель продолжил эксплуатацию и при наработке ППР 321 час двигатель был отстранен по забоинам лопаток, пробы на анализ больше не поступали.

Таким образом, количество частиц изнашивания, их элементный состав и количество составов «сложных» частиц, измеренные СВЧ плазменным методом могут быть использованы в качестве эффективных критериев оценки технического состояния двигателей при проведении ПСИ. Это следует из того, что в двух из одиннадцати двигателей по результатам анализа пробы смыва возможное повреждение на этапе ПСИ определено верно, еще в одном при наработке 161 час параметры значительно снизились. Из остальных восьми - четыре эксплуатируются без замечаний, два находятся в резерве, один выработал ресурс, еще одному выполнен локальный ремонт, не связанный с маслосистемой.

Также верно определено состояние двигателя №489–064 по пробе масла с ПКП. Высокие параметры частиц изнашивания при ПСИ вошли в норму через 100 часов наработки и в дальнейшем двигатель эксплуатировался без замечаний.

В работе [4] указано, что одним из основных критериев оценки состояния двигателей может являться параметр «размер частиц» изнашивания. Данный

параметр при установившемся, равновесном процессе изнашивания зачастую является эффективным критерием [4]. Однако, предельный размер частиц, свидетельствующий о начальном развитии повреждения, разные авторы оценивают по-разному. Имеются публикации сообщающие, что повреждение возникает уже при размерах частиц более 15 мкм [93; 94]. Другие исследователи сообщают об обнаружении частиц в маслосистеме двигателя более 100 мкм, при которых двигатель успешно эксплуатировался [35; 46]. Отсюда видно, что отсутствует единая точка зрения на граничное значение по размерам частиц изнашивания, при которых обнаруживается повреждение. Оценим возможность использования параметра «размер частиц» для выявления возможного повреждения в двигателях при проведении ПСИ.

Обратимся к рисункам 4.2, 4.4, 4.7. Видно, что граничные значения правой стороны распределений значительно отличаются. В двигателе №190–041 максимальный размер частиц составил 22 мкм, в двигателе №189–021 граница сместилась на 145 мкм, а в двигателе №42–085 распределение заканчивается при размерах частиц 335 мкм. Если при оценке состояния двигателей принимать во внимание только размер частиц, то наихудшее состояние имеет двигатель №42–085. Тем не менее, двигатель №42–085 в 2023 году эксплуатировался без замечаний, в то время как двигатель №189–021 был отстранен от эксплуатации по инциденту при ППР 403 часа. Проведенные измерения размеров частиц в двигателе №189–021 после инцидента показали, что максимальный размер частиц изменился в большую сторону, с 145 мкм до 200 мкм, при этом сместился и максимум распределения с 5-15 мкм стал более широким 5-55 мкм.

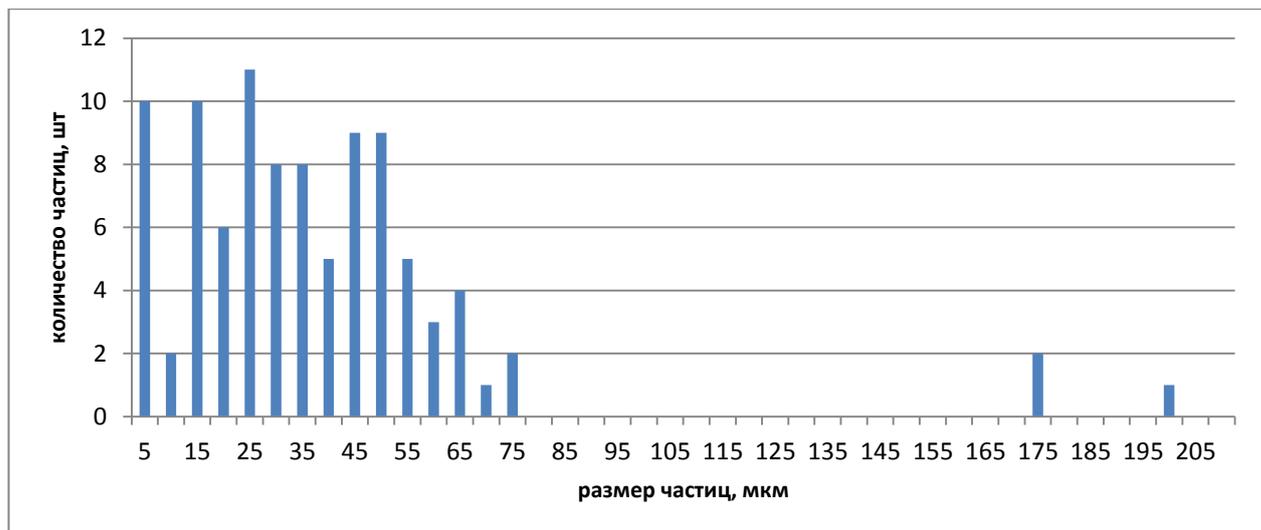


Рисунок 4.8 – Диаграмма распределения частиц по размерам №189–021 после инцидента при наработке ППР 403 часа.

Отсюда следует, что изменение формы распределения частиц по размерам определяется типом изнашивания и максимальный размер частиц не всегда может служить признаком повышенного износа узлов, омываемых смазочным маслом.

4.4. Выводы по главе

1. в качестве метода контроля состояния узлов трения ГТД, омываемых смазочным маслом, при проведении ПСИ предложено и обосновано применение СВЧ плазменного анализатора;
2. исследованы пробы с 83 двигателей, поступивших на ПСИ после капитального ремонта. Показан большой разброс по параметрам частиц. Так, максимальный размер частиц от двигателя к двигателю мог изменяться от 20 мкм до 335 мкм, количество частиц менялось более чем на порядок. Величина массовой доли железа различалась более 5 раз. Различие по меди меньше и составило 2-3 раза;

3. разработаны статистические модели состояния двигателя, рекомендованного после ПСИ к эксплуатации. Для построения моделей найдены критерии выбраковки двигателей с худшими характеристиками, которые не включались в модели. Статистические эталонные модели разработаны по пробам масел с ПКП, ЗКП и смыва с маслофильтра МФС-30;
4. проведена оценка возможности использования параметра «размер частиц» для выявления возможного повреждения в двигателях при проведении ПСИ. Показано, что изменение формы распределения частиц по размерам определяется типом изнашивания и максимальный размер частиц не всегда может служить признаком повышенного износа узлов, омываемых смазочным маслом;
5. при принятии диагностического решения должен учитываться «вес» параметров, по которым наблюдаются превышения. «Вес» параметра определяют, как правило, «сложные» частицы, типа Fe-Cu, Cu-Ag, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, Al-Cu и т.д. Чем больше зарегистрировано таких частиц, тем хуже состояние двигателя. Надежно установлено, что регистрация одноэлементных частиц ванадия и (либо) частиц сплава с ванадием, типа Fe-Cr-Ni-V в количестве 3-5 штук с большой вероятностью свидетельствует о начале повреждения. При обнаружении одноэлементных частиц, типа Al, Mg, Cu связи с ухудшением технического состояния двигателя не выявлено;
6. количество частиц изнашивания, их элементный состав и количество составов «сложных» частиц, измеренные СВЧ плазменным методом могут быть использованы в качестве эффективных критериев оценки технического состояния двигателей при проведении ПСИ. По результатам анализа проб смывов из 81 проанализированного двигателя выявлено 11 двигателей, параметры частиц которых вышли за граничное значение $(\bar{x} + 3\sigma)$. Два из них (двигатели №№189-021 и 37-729) отстранены от эксплуатации по повреждениям узлов маслосистемы. С

большой долей уверенности можно предполагать, что данные двигатели поступили на ПСИ с начальными признаками повреждений, которые в процессе дальнейшей их эксплуатации привели к инциденту. Ещё в одном при наработке 161 час параметры значительно снизились. Из остальных восьми - четыре эксплуатируются без замечаний, два находятся в резерве, один выработал ресурс, еще одному выполнен локальный ремонт, не связанный с маслосистемой;

7. верно определено состояние двигателя №489–064 по пробе масла с ПКП. Высокие параметры частиц изнашивания при ПСИ вошли в норму через 100 часов наработки и в дальнейшем двигатель эксплуатировался без замечаний;
8. с целью снижения вероятности возникновения инцидентов с двигателями, параметры которых вышли за уровень $(\bar{x} + 3\sigma)$ отпадает необходимость производить в эксплуатации массовый отбор проб со всех двигателей, прошедших ПСИ. При этом формируется выборка двигателей, имеющих повышенные параметры по результатам ПСИ и в дальнейшем достаточно минимального количества (1-2) проб в процессе эксплуатации для принятия решения о продолжении их эксплуатации или превентивного восстановления в условиях эксплуатации или предприятия на этапе предотказного состояния.

Основные результаты и выводы

При выполнении данной работы решены две новые научно-технические задачи:

- усовершенствован атомно-эмиссионный СВЧ плазменный (сцинтилляционный) анализатор для измерения параметров металлической примеси в пробах смазочных масел;

- разработана экспериментальная методика оценки состояния узлов маслосистемы авиационных двигателей по параметрам частиц изнашивания после проведения ПСИ.

Следует отметить, что часть технических и методических решений выполнено на уровне изобретений. Такое стало возможным благодаря проведенному комплексу теоретических и экспериментальных исследований по испаряемости металлических частиц изнашивания в потоке плазмы, созданию новой конструкции распылителя жидких проб, влиянию вязкости пробы на измерение параметров частиц и т. д.

С другой стороны, за счет взаимодействия с заводами-изготовителями авиационных двигателей СВЧ плазменный анализатор был поставлен в ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск), а также поставлен и внедрен в производственный цикл на АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь).

Основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1. экспериментально установлено, что граница полной испаряемости металлических частиц в СВЧ плазме составляет 20 мкм. В качестве аналитического параметра при измерении массовой доли СВЧ плазменным методом возможно использование интегрального параметра M_2 ;
2. разработана новая конструкция УЗ распылителя жидких проб. В разработанной конструкции не происходит разрушение распыляющего капилляра ни в области крепления его со смесителем, ни в области

- изгиба. Нарботка на отказ не менее 2500 часов. Данная конструкция защищена патентом РФ на полезную модель и использовалась в составе СВЧ плазменного анализатора в настоящей работе;
3. проведена оптимизация способа измерения элементного состава частиц изнашивания по результатам СВЧ плазменных измерений. Показано, что число достоверных измерений элементного состава от общего числа частиц на СВЧ плазменном анализаторе составляет не менее 96%. Сравнительные измерения элементного состава частиц изнашивания СВЧ плазменным методом и ЭРСМА показали качественную близость полученных результатов;
 4. разработаны способ и устройство, защищенные патентом РФ, позволяющие устранить влияние вязкости масла на размер формируемых капель при УЗ распылении пробы. Показано, что при распылении масла при температуре $T=85^{\circ}\text{C}$ образуются капли размером не более 50 мкм, которые полностью сгорают в СВЧ плазменной струе;
 5. в качестве метода контроля состояния узлов трения ГТД, омываемых смазочным маслом, при проведении ПСИ предложено и обосновано применение СВЧ плазменного анализатора. Для контроля состояния двигателей после ПСИ разработаны статистические эталонные модели исправных двигателей, для которых найдены критерии выбраковки двигателей с худшими характеристиками. Статистические эталонные модели разработаны по пробам масел с ПКП, ЗКП и смыва с маслофильтра МФС-30;
 6. проведена оценка возможности использования параметра «размер частиц» для выявления возможного повреждения в двигателях при проведении ПСИ. Показано, что изменение формы распределения и максимальный размер частиц не всегда может служить признаком повышенного износа узлов, омываемых смазочным маслом;
 7. при принятии диагностического решения по состоянию двигателя после ПСИ должен учитываться «вес» параметров, по которым наблюдаются

превышения. «Вес» параметра определяют, как правило, «сложные» частицы, типа Fe-Cu, Cu-Ag, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, Al-Cu и т.д. Установлено, что регистрация одноэлементных частиц ванадия и (либо) частиц сплава с ванадием, типа Fe-Cr-Ni-V в количестве 3-5 штук с большой вероятностью свидетельствует о начале повреждения. При обнаружении одноэлементных частиц, типа Al, Mg, Cu связи с ухудшением технического состояния двигателя не выявлено;

8. количество частиц изнашивания, их элементный состав и количество составов «сложных» частиц, измеренные СВЧ плазменным методом могут быть использованы в качестве эффективных критериев контроля технического состояния двигателей при проведении ПСИ.

Список литературы

1. 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.
2. Сиротин, Н. Н. Повреждаемость и работоспособность авиационных ГТД : справочник / Н. Н. Сиротин, Е. Ю. Марчуков, А. С. Новиков. – М. : Наука, 2015. – 551 с. – ISBN: 978-5-02-039160-4.
3. Прейс, А. А. Анализ процесса старения авиационных двигателей Д-30Ф6 при эксплуатации / А. А. Прейс // Вестник СибГАУ. – 2008. № 4(21). – С. 111–114.
4. 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.
5. 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.
6. Сундуков, А. Е. К вопросу нормирования диагностических признаков износа зубьев редукторов авиационных газотурбинных двигателей. / А. Е. Сундуков, Е. В. Шахматов. – DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-28-37 // Вестник самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2022. – Т.21, №2 – С. 28–37.
7. Карасик, И.И. Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» :

- автореф. дис. . . . д-ра техн. наук / И. И. Карасик; ВНИИНМАШ. – М., 1983. – 32 с.
8. Дроков В.Г. Состояние и пути повышения эффективности использования трибодиагностических методов оценки технического состояния узлов трения ГТД / В. Г. Дроков // Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века» : сборник тезисов докладов (Москва 24-27 ноября 2015 г.) / ЦИАМ. – Москва : Изд-во ЦИАМ, 2015. – С. 930-932.
 9. 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.
 10. Оценка технического состояния двигателя по содержанию металлических примесей в масле : бюллетень № 384-БД-Г. – М., 1986. – 11 с.
 11. Аттестат методики измерения концентрации продуктов изнашивания на установках типа МФС при диагностике авиационных двигателей. – М.: Изд-во ГосНИИГА, 1993. – 20с.
 12. Кюрегян, С. К. Атомный спектральный анализ нефтепродуктов / С. К. Кюрегян. – М.: Химия. 1985. – 320 с.
 13. 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).
 14. 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.
- 15.Спектральный анализ чистых веществ ; под ред. Х. И. Зильберштейн. – Л.: Химия. 1971. – 415 с.
- 16.Итоги разработки, испытаний, сертификации и промышленной апробации автоматизированного комплекса рентгенофлуоресцентного анализа смазочных материалов «ПРИЗМА»: отчет по НИОКР ; отв. исполн. В. К. Забельский. – Москва: АОЗТ «Южполиметалл-холдинг». 2000. – 70 с.
- 17.Аттестат методики измерения концентрации продуктов изнашивания на анализаторах БАРС-3 при диагностике авиационных двигателей. – М.: Изд-во ГосНИИГА, 1993. – 11 с.
- 18.Степанов, В. А. Разработка и исследование методов и средств комплексной диагностики смазываемых узлов трения газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле : специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки», 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : автореф. дис. . . . д-ра техн. наук / В. А. Степанов; ГНЦ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова». – М., 2000. – 40 с.
- 19.Резников В. Диагностика двигателя по анализу масла / В. Резников // Основные средства. – 2008. – № 3. – URL: <https://os1.ru/article/7223-diagnostics-dvigatelya-po-analizu-masla> (дата обращения: 06.12.2023)
- 20.Калашников, С. И. Применение анализатора БАРС-3 для технической диагностики авиационной техники / С. И. Калашников. – М.: 1985 – 80с.
- 21.Методика диагностирования узлов трения, омываемым смазочным маслом, двигателей Д-30КУ и Д-30КП методом рентгеноспектрального анализа. – М.: 1990. – 4 с.
- 22.Лосев, Н. Ф. Количественный рентгеноспектральный анализ / Н. Ф. Лосев. – М.: Наука, 1969. – 336 с.

- 23.Павлинский, Г. В. Основы физики рентгеновского излучения / Г. В. Павлинский. – М.: Изд-во Физматлит. 2007. – 240 с. – ISBN 978-5-92-210783-9, 978-5-9221-0783-9.
- 24.Павлинский, Г. В. О рентгенофлуоресцентном анализе отфильтрованного осадка отработанных авиационных масел / Г. В. Павлинский, В. Г. Дроков, Е. О. Баранов, А. Е. Калошин, Ю. Д. Скудаев // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 2. – С. 21–26.
- 25.Павлинский, Г. В. Зависимость интенсивности рентгеновской флуоресценции отдельной частицы от ее формы, размеров и ориентации в пространстве / Г. В. Павлинский, Е. О. Баранов, В. Г. Дроков, Л. И. Владимирова, А. А. Рыбакова // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 6. – С. 8–15.
- 26.Юдин, А. А. Рекомендации по нормированию критериев оценки технического состояния узлов трансмиссии ГТД по результатам спектрального анализа масел / А. А. Юдин, В. А. Степанов // Конверсия в машиностроении. – 2002. – № 2. – С. 35–41.
- 27.Дасковский, М. И. Эффективность комплексного применения различных методов трибодиагностики при эксплуатации двигателя ПС-90А / М. И. Дасковский, О. Ф. Машошин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 178. – С. 115–122.
- 28.Степанов, В. А. Применение феррографического и рентгеноспектрального методов для диагностики технического состояния авиационных турбохолодильников по содержанию частиц износа в смазочном масле / В. А. Степанов, С. И. Калашников, В.С. Угрюмов // М., Тр. ЦИАМ. – 1986 – № 1159 – С. 5–8.
- 29.Грядунов, К. И. Оценка достоверности результатов анализа проб масел на АДК "Призма" / К. И. Грядунов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 183. – С. 41–45.

30. 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.
31. Павлинский, Г. В. Рентгенофлуоресцентный контроль неоднородности осадков отработанного масла авиационных двигателей / Г. В. Павлинский, Л. И. Владимирова, В. Г. Дроков, Т. Д. Степук // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т. 82. № 2. – С. 40–42.
32. Количественный электронно-зондовый микроанализ ; под ред. В. Скотта, Г. Лава. – М.: Мир, 1986. – 352 с.
33. Павлова, Л. А. Электронно-зондовый анализ и его применение : моногр. / Л. А. Павлова. – Lambert Academic Publishing, 2014. – 294 с.
34. Микроанализ и растровая электронная микроскопия ; под ред. Ф. Морис, Л. Мени, Р. Тиксье. – М.: Металлургия, 1985. – 392 с.
35. 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).
36. Техническая справка по двигателям Д-30КП/КУ/КУ-154, имевшим неисправности узлов и агрегатов при контроле сцинтилляционным методом за период 2000–2007 гг. : техническая справка № 44-517141515887 ; ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2008. – 20 с.
37. Анализ съёмов двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 за период 2000-2004 гг. по неисправностям узлов, омываемых смазочным маслом : тех. справка № 44-596168 ; ОАО НПО «Сатурн». – Рыбинск, 2005. – 32 с.
38. Binek B. Szintillationsspektralanalyzer fur ein Aerosolteilchen / B. Binek // Staub. – 1960. – V.20. – P. 184

- 39.Крестьянинов, А. Г. Применение плазмотрона при сцинтилляционном методе анализа золота в рудах / А. Г. Крестьянинов, Я. Д. Райхбаум, А. Д. Корецкая, Н. М. Маркова // Применение плазмотрона в спектроскопии: Сборник статей. Фрунзе. Илим. – 1970. – С. 174–179.
- 40.Симонова, В.И. Спектроскопическое исследование системы аэрозоль-плазма с целью совершенствования метода спектрального анализа : автореф. дис. . . . канд. физ.-мат. наук / В. И. Симонова – Иркутск, 1975. – 27с.
- 41.Патент № 2167407 С2 Российская Федерация, МПК G01N 15/06, 33/28. Способ анализа жидкостей на металлы – продукты износа узлов и механизмов, омываемых этими жидкостями : № 96116085 : заявл. 05.08.1996 : опубл. 20.05. 2001 / А. Б. Алхимов, В. Г. Дроков, В. П. Зарубин [и др.] ; заявитель Научно-исследовательский институт прикладной физики при Иркутском государственном университете, Авиакомпания «Байкал». – 4 с. : ил.
- 42.Патент № 2118815 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/73. Способ определения микропримесей металлов в смазочных маслах, топливах и специальных жидкостях и устройство для его осуществления : № 96102385 : заявл. 07.02.1996 : опубл. 10.09. 1998 / А. Б. Алхимов, В. Г. Дроков, В. П. Зарубин [и др.] ; заявитель Научно-исследовательский институт прикладной физики при Иркутском государственном университете, Авиакомпания «Байкал». – 8 с. :ил.
- 43.Дроков, В. Г. Повышение достоверности результатов диагностирования газотурбинных двигателей сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта», 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (по отраслям)» : дис. . . . д-ра техн. наук / В. Г. Дроков; ГосНИИ ГА. – М., 2009. – 325 с.

44. Патент № 2239172 С2 Российская Федерация, G01N 15/00. Способ диагностики состояния двигателей: № 2001130399/06: заявл. 13.11.2011 : опубл. 27.10.2004 / М. С. Гайдай, В. Г. Дроков, А. Д. Казмиров [и др.] ; патентообладатель ОАО НПО «Сатурн», ООО «Диагностические технологии». – 7 с. : ил.
45. Степанов, В. Л. Опыт применения феррографии для диагностики технического состояния авиационных агрегатов / В. Л. Степанов, В.Н. Захаров // Опыт применения и перспективы развития диагностики состояния авиадвигателей в эксплуатации : труды межотраслевой науч.-техн. конф. – Москва, 1984. – С. 16–18.
46. Халлиулин, В. Ф. MetalScan в действии / В. Ф. Халлиулин, Ф. И. Мухутдинов // Пермские авиационные двигатели. – 2014. – № 29. – С. 48–49.
47. 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.
48. Дроков, В.В. Разработка технологии диагностирования авиадвигателей, оснащённых фильтроэлементом с диагностическим слоем / В. В. Дроков, В. Г. Дроков, В. В. Мурыщенко, Ф. И. Мухутдинов, В. Ф. Халиуллин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2014. – Т. 13. – №5-3. – С. 212–218.
49. Богоявленский, А. А. Теоретические основы и практические методы метрологического обеспечения специальных средств измерений на воздушном транспорте судов : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта» : дис. . . . д-ра техн. наук / А. А. Богоявленский; ГосНИИ ГА. – М., 2018. – 333 с.
50. Богоявленский, А. А. Метрологическое обеспечение работ по неразрушающему контролю и диагностированию авиационной техники /

- А. А. Богоявленский, О. Л. Ермолаева //Научный вестник МГТУ ГА – 2012. – № 175. – С. 154-157.
- 51.Методические указания по изготовлению и метрологической аттестации стандартных образцов продуктов изнашивания для градуировки анализаторов БАРС-3 при диагностировании авиадвигателей. – М.: ГосНИИ ГА, 1993. – 17с.
- 52.Методические указания по изготовлению и метрологической аттестации стандартных образцов концентрации продуктов изнашивания для градуировки установок типа МФС при диагностировании авиадвигателей (на основе окислов). – М.: ГосНИИ ГА, 1993. – 16 с.
- 53.Богоявленский, А.А. Технологии изготовления и метрологической аттестации стандартных образцов концентрации продуктов изнашивания в работающих маслах / А. А. Богоявленский // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – (199) – С. 134–139.
- 54.Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Л.П. Лозицкий, В.П.Степаненко [и др.] ; под ред. В. П. Степаненко. – Москва.: Транспорт, 1985 – 102 с.
- 55.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.
- 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. 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.
58. Свидетельство об утверждении типа стандартного образца RU.C.01.442.A №4639/1. Регистрационный № ГСО10696-2015.
59. Экнадиосянц, О. К. Получение аэрозолей / О. К. Экнадиосянц // Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.
60. Источник мощного ультразвука ; под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 380с.
61. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве : моногр. / В. Н. Хмелев, Г. В. Леонов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов – Барнаул : Изд-во АлтГТУ имени И.И. Ползунова, 2007. – 400с. – ISBN: 978-5-9257-0104-1.
62. Применение ультразвуковых колебаний для распыления жидкостей / В. Хмелев, А. Шалунов, Р. Голых, В. Нестеров // Ультразвук: Проблемы, разработки, перспективы: материалы докладов Междунар. науч. конф. (Уфа, 25-29 сентября 2017 г.) / Институт проблем сверхпластичности металлов РАН. – Уфа : РИЦ БашГУ, 2017. – С. 80–82.
- 63.. Пажи, Д. Т. Основы техники распыления жидкостей / Д. Т. Пажи, В. С. Галустов, – М.: Химия, 1984. – 256 с.
64. Основы аналитической химии. В 2 т. Т. 2 : учеб. для студ. учреждений высш. проф. образования / Н.В. Алов и др. ; под ред. Ю.А.Золотова. – М.: Издательский центр «Академия», 5-е изд., стер., 2012. – 409 с.

65. Казмиров, А. Д. Взаимодействие мелкодисперсных частиц с потоком плазмы атмосферного давления в канале СВЧ плазменного атомизатора порошковых проб : специальность 02.00.02 «Аналитическая химия» : автореф. дис. . . . канд. физ.-мат. наук / А. Д. Казмиров; Институт геохимии им. А. П. Виноградова. – Иркутск, 1995. – 17с.
66. Патент № 2119390 С1 Российская Федерация, МПК В05В 17/06. Ультразвуковой распылитель : № 95100339/25 : заявл. 16.01.1995 : опубл. 27.09.1998 / А. Б. Алхимов, В. Г. Дроков, В. Н. Морозов, Ю. Д. Скудаев ; заявитель Научно-исследовательский институт прикладной физики при Иркутском государственном университете. – 4 с. : ил.
67. Патент № 98945 U1 Российская Федерация, МПК В05В 17/06 (2006.01). Ультразвуковой распылитель : № 2010122218/13 : заявл. 31.05.2010 : опубл. 10.11.2010 / В. В. Дроков, В. Г. Дроков, Ю. Д. Скудаев, В. Н. Хмелев ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «ИГУ». – 2 с. : ил.
68. Патент № 128521 U1 Российская Федерация, МПК В05В 17/06 (2006.01). Ультразвуковой распылитель : № 2012154502/05 : заявл. 14.12.2012 : опубл. 27.05.2013 / В. Г. Дроков, Ю. Д. Скудаев, А. Ю. Ходунаев ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «ИГУ». – 1 с. : ил.
69. Патент № 146359 U1 Российская Федерация, МПК В05В 17/06 (2006.01). Ультразвуковой распылитель : № 2014124060/05 : заявл. 11.06.2014 : опубл. 10.10.2014 / В. В. Дроков, И. В. Лисун, Ю. Д. Скудаев ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «ИГУ». – 2 с. : ил.
70. Патент № 157338 U1 Российская Федерация, МПК В05В 17/06 (2006.01). Ультразвуковой распылитель : № 2015129876/05 : заявл. 20.07.2015 : опубл. 27.11.2015 / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, И. В. Лисун, Ю. Д. Скудаев ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «ИГУ». – 2 с. : ил.
71. Патент № 187161 U1 Российская Федерация, МПК В05В 17/06 (2006.01). Ультразвуковой распылитель : № 2018147450 : заявл. 29.12.2018 : опубл. 21.02.2019 / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, А. Д. Казмиров, В. В. Мурыщенко [и др.] ; патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – 7 с. : ил.

- 72.Славный, В. А. Предельная чувствительность регистрации спектральных линий / В. А. Славный // Журн. прикл. спектроскопия. – 1967. – т. 6. – № 5. – С. 695-706.
- 73.Славный, В. А. Предельная чувствительность регистрации спектральных линий / В. А. Славный // Журн. прикл. спектроскопия. – 1967. – т. 7. – № 1. – С. 123-134.
- 74.Прокопчук, С. И. Сцинтилляционный спектральный анализ в геологии / С. И. Прокопчук – Иркутск, Институт геохимии СО РАН, 1994. – 64 с.
- 75.Сайченко, А.Н. Разработка автоматизированного способа эмиссионного спектрального определения золота в геологических пробах : автореф. дис. . . . канд. техн. наук / А. Н. Сайченко – Иркутск, 1987 – 16 с.
- 76.Васильева, И. Е. Методика определения золота и серебра в геологических образцах с использованием сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа и высоким временным разрешением / И.Е. Васильева, Е.В. Шабанова, А.Е. Бусько, А.Б. Кунаев // Аналитика и контроль. – 2010. – Т. 14. - №7 – С. 201-213.
- 77.Купцов, А. В. Аналитические возможности определения благородных металлов методом сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии на двухструйном дуговом плазмотроне. специальность 02.00.02 «Аналитическая химия» : дис. . . . канд. техн. наук / А. В. Купцов; ФГБУН ИНХ СО РАН – Новосибирск, 2018. – 137 с.
- 78.Райхбаум, Я. Д. Сцинтилляционный метод спектрального анализа тантала и ниобия в рудах / Я. Д. Райхбаум, В. Д. Малых, М. А. Лужнова // Заводская лаборатория. – 1963. – т. 29. – № 6. – С. 677-680.
- 79.Крестьянинов, А. Г. Исследование и разработка сцинтилляционного метода оптического эмиссионного спектрального анализа : автореф. дис. . . . канд. физ.-мат. наук / А. Г. Крестьянинов; ИГУ им. А. А. Жданова. – Иркутск, 1968. – 21 с.

- 80.Симонова, В. И. К теории спектрального анализа аэрозолей, вдуваемых в плазму / В. И. Симонова, Я. Д. Райхбаум, В. Г. Дроков. // Журнал. Прикладная спектроскопия. – 1974. – Т. 21. – № 5. – С. 787–794.
- 81.Алхимов, А. Б. Передаточная функция СВЧ плазмотрона как источник сцинтилляционных сигналов / А. Б. Алхимов, В. Г. Дроков, А. Д. Казмиров, В. Н. Морозов. // Журн. аналит. химия. – 1996. – Т. 51. – №9 – С. 939–944.
- 82.Алхимов, А. Б. Некоторые аналитические возможности СВЧ плазменного спектрометра при анализе авиационных масел / А. Б. Алхимов, В. Г. Дроков, В. П. Зарубин, А.Д. Казмиров // 1^{ая} международная конф. Энергодиагностика : сборник трудов. – Т. 3. – Трибология. – 1995. – С. 331–339.
- 83.Хмелев, В. Ультразвуковое распыление жидкостей : моногр. / В. Хмелев, А. Шалунов, А. Шалунова. – Бийск : Изд-во АлтГТУ имени И.И. Ползунова, 2010. – 250 с. – ISBN 978-5-9257-0177-5.
- 84.ANSYS. Theory Ref. Rel. 8.0. Ed. P. Kothnke/ANSYS Inc. Houston, 2003.
- 85.Стренг, Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М., Мир, 1977. – 349 с.
- 86.Наседкин А. В. Моделирование некоторых типов задач термоэлектроупругости в ANSYS / А.В. Наседкин // Сборник трудов четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD–FEM GMBL (Москва, 21-22 апреля 2004 г.). – М., 2004. – С. 311–315.
- 87.Патент № 193338 U1 Российская Федерация, МПК В05В 17/06 (2006.01). Ультразвуковой распылитель : № 2019121387 : заявл. 09.07.2019 : опубл. 24.10.2019 / Дроков В. Г., Дроков В. В., Иванов Н. А., Казмиров А. Д. [и др.] ; патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – 6 с. :ил.

- 88.Измерение размеров капель жидкости, получаемых при различных режимах работы ультразвуковых распылителей / В. Хмелев [и др.] // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3–2. – С. 179.
- 89.Патент № 2569926 Российская Федерация, МПК G01N 15/02 (2006.01). Способ определения размера капель в аэрозоле : № 2014134964/28 : заявл 26.08.2014 : опубл 10.12.2015 / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, Ю. Д. Скудаев, В. А. Яковлев ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «ИГУ». – 6 с. : ил.
- 90.Патент № 201278 U1 Российская Федерация, МПК H05H 1/46 (2006.01), B05B 17/04 (2006.01). СВЧ-плазматрон с подогревом распыляемого вязкого масла : № 2020131290 : заявл. 23.09.2020 : опубл. 08.12.2020 / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко, Ю. Д. Скудаев ; патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – 5 с. : ил.
- 91.Дроков, В. Г. Результаты микрорентгеноспектральных измерений состава частиц изнашивания в системе смазки авиационных газотурбинных двигателей / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко, Л. А. Павлова, Ю. Д. Скудаев // Научный Вестник ГосНИИ ГА. – 2020. – № 33. – С. 19–29.
- 92.Методика диагностирования МД-1-00-2020. Методика диагностирования двигателей при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным комплексом : методика диагностирования МД-1-00-2020. Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 / – Иркутск, 2020. – 46 с.
- 93.Bowen, E. R. Wear particle atlas / E. R. Bowen, V. C. Westcott. – Burlington, USA : Foxboro/Trans-Sonics, Inc., 1976. – 55 p.
- 94.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.

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный конструктор
ПАО «ОДК-Сатурн»



Р.В. Храмин

« _____ » 2024 г.

АКТ

о применении результатов диссертационной работы В.В. Мурыщенко
«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СВЧ ПЛАЗМЕННОГО АНАЛИЗАТОРА И МЕТОДИК
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ, ОМЫВАЕМЫХ СМАЗОЧНЫМ МАСЛОМ
АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
ПРИЁМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ»

Результаты диссертационной работы инженера В.В. Мурыщенко использованы при создании анализатора для комплексного измерения параметров частиц изнашивания и технологий принятия высокодостоверного диагностического решения при оценке технического состояния узлов двигателей Д-30КП/КП-2.

Для ПАО «ОДК-Сатурн» разработан и поставлен СВЧ плазменный (сцинтилляционный) анализатор масла САМ-ДТ-01. В составе анализатора используется конструкция распылителя проб масел, разработанная В.В. Мурыщенко, на которую получен патент на изобретение.

Уникальностью применения разработанного СВЧ плазменного анализатора является возможность выявления при диагностике состояния газотурбинного двигателя поврежденного узла. Например, двигатель Д-30КП-2 №22-069 при наработке 169 часов был выключен в полете по срабатыванию сигнализации «стружка в масле». При диагностировании разработанным СВЧ плазменным анализатором было выявлено повреждение лабиринтного уплотнения. В результате на двигателе в эксплуатации были проведены соответствующие работы, после чего двигатель допущен к дальнейшей эксплуатации. В случае возврата двигателя на предприятие затраты на его исследование и восстановление составили бы не менее 20 млн. рублей. Таким образом, за счёт диагностирования очага частиц износа может быть достигнут значительный экономический эффект.

Дополнительно в рамках выполнения работ по техническому указанию №1/53-2017 для ПАО «ОДК-Сатурн» была разработана методика диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2 при выполнении приемо-сдаточных испытаний, позволяющая отделить эффект приработки деталей от повышенного износа узлов, омываемых смазочным маслом. Результаты проведённых работ являются перспективными с точки зрения диагностированию состояния газотурбинных двигателей на протяжении всего жизненного цикла.

Главный конструктор двигателей
Д-30КУ/КП/КУ-154 и ГТД-6/8РМ



С.В. Багров