

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте прикладной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» (НИИ прикладной физики ФГБОУ ВО «ИГУ»).

Научный руководитель: **Дроков Виктор Григорьевич**,
доктор технических наук,
НИИ прикладной физики ФГБОУ ВО «ИГУ»,
ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Исаев Александр Иванович**,
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «ИРНТУ»,
профессор

Минаков Виталий Анатольевич,
кандидат технических наук,
ОмГУПС,
доцент

Ведущая организация: Государственный научный центр, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», г. Москва

Защита состоится 25.12.2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.01, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11, главный корпус, П-202.

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

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

Тел.: +7 (3812) 62-85-58, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Автореферат разослан _____ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.350.01,
кандидат технических наук,
доцент



Завьялов С. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Сведения по эксплуатации авиационных двигателей Д30–КП/КП–2 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.

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.

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.

В качестве высокоэффективного способа контроля технического состояния авиадвигателей с малой наработкой и контроля качества выпускаемой продукции предложено использовать СВЧ плазменный (сцинтилляционный) метод [2]. 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 [3], 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, соответствия СВЧ плазменных измерений элементного состава частиц контрольному методу. 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 – для контроля состояния 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 для контроля 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 контроля технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, проходящих приёмосдаточные испытания после их ремонта и технического обслуживания.

Для достижения поставленной цели 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 «сумма 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 приёмсдаточные испытания, позволит повысить качество выпускаемой продукции и безопасность полетов;
5. новые подходы по оценке технического состояния авиационных двигателей, прошедших приёмсдаточные 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 РФ на полезную модель для подачи и распыления жидких проб в источник возбуждения спектров. Проведенные в течении нескольких лет в испытаниях разработанной 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 приёмсдаточных 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 совещании 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.

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

Полный объём диссертации составляет 134 страниц, включая 48 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 94 наименования.

Содержание работы

Во введении сформулирована актуальность работы, дана краткая характеристика работы, её новизна и практическая значимость.

Глава 1 посвящена анализу литературных данных по применяемой наземной аппаратуре и методическому обеспечению способов контроля, смазываемых узлов трения авиационных ГТД по параметрам частиц изнашивания. Показано, что СВЧ плазменный метод контроля является наиболее перспективным для использования его при проведении приёмосдаточных испытаний новых авиадвигателей.

Глава 2 посвящена выбору нового аналитического параметра, снижающего влияние размеров частиц при измерении массовой доли металлической примеси в пробах масел и установлению соответствия между величиной импульсного сигнала и размером частицы при СВЧ плазменных измерениях.

В ранних исследованиях по сцинтилляционному анализу предпринимались попытки установления связи между величиной импульсного сигнала и массой частицы. Часть исследователей считала возможным по единичному импульсу определять размер частицы, другие исследователи свидетельствуют об отсутствии связи между сигналом и размером частицы [4; 5].

Результаты работы [4] по влиянию параметров СВЧ плазмотрона на выходной сигнал получены для «чистой» воздушной плазмы с температурой 5200К. При анализе проб масел температура плазмы ниже, соответственно изменится влияние ИВС на выходной импульсный сигнал. Для изучения влияния характеристик «запыленной» плазмы на выходной импульсный сигнал использовались теоретические и экспериментальные методы.

Моделирование функции распределения сигналов производилось методом Монте-Карло. В качестве функции распределения частиц по диаметрам принималось логнормальное распределение. Моделирование пробы, имеющей дискретно распределенную примесь, осуществлялось по следующему алгоритму. Задавались параметры пробы: C — содержание элемента (г/т), M_p — масса пробы (г) и параметры функции распределения частиц по размерам: d_m и d_σ (мкм). Генерировалось N частиц со случайными размерами

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

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

$$\sum_{i=1}^N \frac{\rho}{6} \pi d_i^3 = M \quad (2)$$

Вследствие случайности размеров генерируемых частиц равенства в выражении (2) 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.

Передаточная функция источника возбуждения спектров моделировалась из условий, полученных в работе [5].

Приведенные расчеты показали, что форма гистограммы распределения сигналов сложным образом зависит от формы функции распределения частиц по размерам. В большинстве случаев при увеличении размеров частиц гистограмма сигналов уширяется, а максимум распределения остается в младших классах. Таким образом, по уширению гистограммы сцинтилляционных сигналов возможно отслеживание изменения размеров частиц.

Это означает, что по величине единичного сцинтилляционного сигнала невозможно оценить испарившуюся массу частицы (соответственно, и размер частицы).

В таблице 1 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. Параметр $[M_k]$ – интегральная характеристика распределения сигналов, рассчитывался по формуле:

$$M_k = \sum_{i=1}^N S^k, i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

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 1 – 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.

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).

Опираясь на результаты математического моделирования, была предпринята попытка установления экспериментальной зависимости параметра M_2 (суммы квадратов площадей сигналов) от изменения размеров частиц.

Для выполнения эксперимента были подготовлены пробы ситовым рассевом с частицами меди следующих фракций: от единиц мкм до 5 мкм, от 5 мкм до 20 мкм, от 20 мкм до 32 мкм.

Навеску фракции частиц от единиц мкм до 5 мкм перенесли в объем 40 мл не работавшего масла МС-8П. Данный объем масла установлен экспериментально 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 8000 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 единиц мкм до 5 мкм (см. рис. 1).

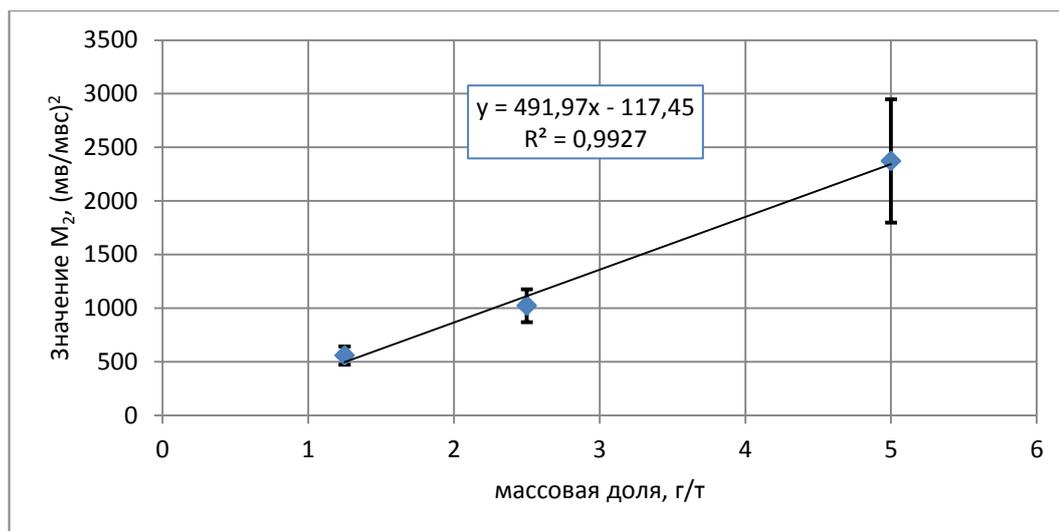


Рисунок 1 – Зависимость параметра (M_2) от массовой доли меди для фракции частиц размером от единиц мкм до 5 мкм.

Из рисунка 1 видно, что значение (M_2) прямо пропорционально изменению массовой доли меди. Коэффициент аппроксимации прямой $R^2=0,99$, что свидетельствует о максимальном испарении металлических частиц в плазме.

График зависимости для фракции 5-20 мкм также характеризуется линейной зависимостью аналитического сигнала от массовой доли элемента, коэффициент аппроксимации прямой $R^2=0,95$.

Подготовка масляных проб фракции от 20 мкм до 32 мкм проводилась по аналогии с пробоподготовкой для фракции частиц от 5 мкм до 20 мкм. Концентрационная зависимость M_2 от массовой доли меди для фракции частиц размером + 20 – 32 мкм представлена на рисунке 2.

График зависимости на рисунке 2 характеризуется большим разбросом точек и меньшим коэффициентом аппроксимации, равным $R^2=0,69$. Пониженный коэффициент аппроксимации свидетельствует о недостаточной проработке в плазме частиц размером более 20 мкм.

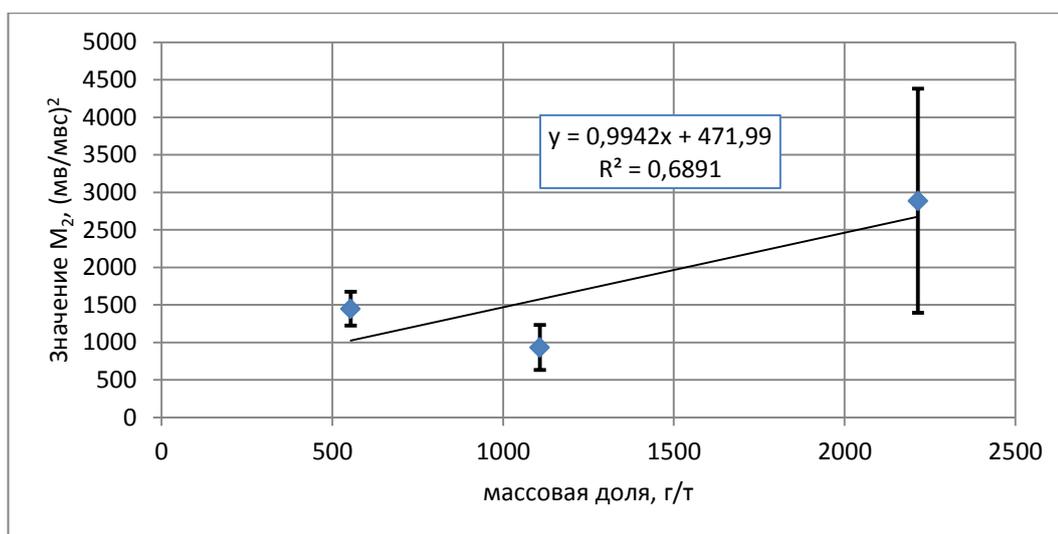


Рисунок 2 – Зависимость параметра (M_2) от массовой доли меди для фракции + 20 – 32 мкм.

Вероятнее всего, при измерении параметров частиц размером более 20 мкм проявляется эффект недоиспарения, который может быть связан с недостаточной температурой на краях воздушной СВЧ плазмы, физико-химическими свойствами анализируемого материала.

Выводы:

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. 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 при измерении массовой доли;
3. экспериментально установлено, что СВЧ плазменный метод позволяет измерять величину массовой доли элементов с высокой надежностью в диапазоне размеров частиц единиц мкм до 20 мкм, в этом диапазоне влияния размеров частиц на сигнал минимальны.

Глава 3 посвящена совершенствованию способов ввода пробы в плазму и регистрации импульсных сигналов.

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 – ИВС (плазменную горелку). При этом распылитель должен обладать достаточно специфическими свойствами:

1. средний размер капель золя должен составлять не более 50 мкм. При таком размере капель полностью выгорает в плазме органическая часть пробы и происходит эффективное испарение и возбуждение паров металлических частиц изнашивания;

2. диаметр распыленной струи пробы масла на длине 30 мм не должен превышать 2 мм. Это условие связано с тем, что диаметр высокотемпературной части струи воздушной плазмы ($T=5200\text{K}$) составляет около 5-6 мм. Такое соотношение диаметров является одним из

условий, позволяющим обеспечить максимальный коэффициент вхождения металлических частиц изнашивания в плазму;

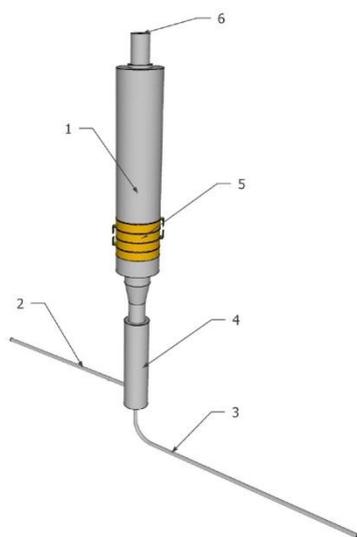
3. капли золя выдуваются из распылителя транспортирующим газом с расходом 0,2 л/мин через капилляр с внутренним диаметром не более 1 мм. При расходе транспортирующего газа 0,2 л/мин достигается максимальный коэффициент вхождения частиц в плазму. Увеличение расхода транспортирующего газа приводит к значительному снижению коэффициента вхождения частиц в плазму;

4. струя должна быть без разрывов и пульсаций;

5. производительность распылителя (расход масла) – 100 - 200 мкл/мин. Такая, сравнительно низкая производительность распылителя позволяет обеспечить поступление металлических частиц изнашивания в плазму последовательно по одной. Последовательное поступление частиц в ИВС позволяет измерить параметры каждой частицы.

Наиболее близкой конструкцией к указанным требованиям является ультразвуковой (УЗ) распылитель, описанный в работе [6]. Проблема данной конструкции заключалась в низкой наработке на отказ, которая варьировалась непредсказуемо – от нескольких минут до нескольких недель.

Для уменьшения напряжения распыляющего капилляра в точке крепления с распыляющей камерой и изменения типа деформации с изгибной на сжатие-растяжение, при которой предел прочности металлов больше, была предложена конструкция, показанная на рисунке 3.



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

Рисунок 3 – Вид рабочей конструкции ультразвукового распылителя с изогнутым распыляющим капилляром

рабочем диапазоне применяемого ультразвукового генератора.

Представленная конструкция распылителя разрабатывалась под масло марки МС-8П, которое использовалось как основное смазочное масло в авиационных двигателях. В настоящее

Для расчетов конструкции распылителя использовался программный продукт ANSYS Workbench (R19.0 Academic, R19.2 Academic, ANSYS Inc., США)

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.

Расчеты были проведены для разных радиусов кривизны и длины горизонтальной части капилляра. Из всех расчетных вариантов, наиболее подходящим по частоте и напряжению был вариант с длинным капилляра 58 мм и радиусом изгиба 8 мм. В этом случае собственная частота 12 моды колебаний составила 22168 Гц, которая находится в

время на замену МС–8П пришли современные полусинтетические и синтетические масла с улучшенными смазывающими свойствами, типа TN–400, TN–600, MT–319, ИПМ–10, отличающиеся от МС–8П большей вязкостью. 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. Были проведены специальные исследования по изучению влияния вязкости новых смазочных масел на размер капель струи аэрозоля и предложен способ, в котором отсутствуют влияния типа смазочного масла на результаты измерения параметров частиц изнашивания. Технически такой способ реализован за счет нагрева капилляра распылителя до температуры, снижающей вязкость пробы до необходимой величины. Экспериментально установлена, что при температуре нагревателя в 203°С, температура масла составляет 85°С, что обеспечивает необходимое снижение вязкости масла для получения капель золя размером не более 50 мкм. На данный способ и устройство для его осуществления получен патент РФ на полезную модель.

Таким образом, разработанная конструкция распылителя удовлетворяет всем сформулированным выше требованиям. В частности, позволяет вводить металлические частицы в горячую зону плазмы, фактически, по одной, что позволяет определить элементный состав каждой частицы.

Элементный состав частиц изнашивания является важным диагностическим признаком, позволяющим выявлять поврежденный узел и оценивать степень его повреждения.

При регистрации сигнала 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.

$$W = R * K \quad (4)$$

где R – длительность импульса, мс; W – интервал совпадения, мс; 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 (см. рис. 4).

Для случая, изображенного на рисунке 4а, будет зарегистрирована частица, состоящая из двух элементов Fe-Cu и одноэлементная частица Al.

На рисунке 4б 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.

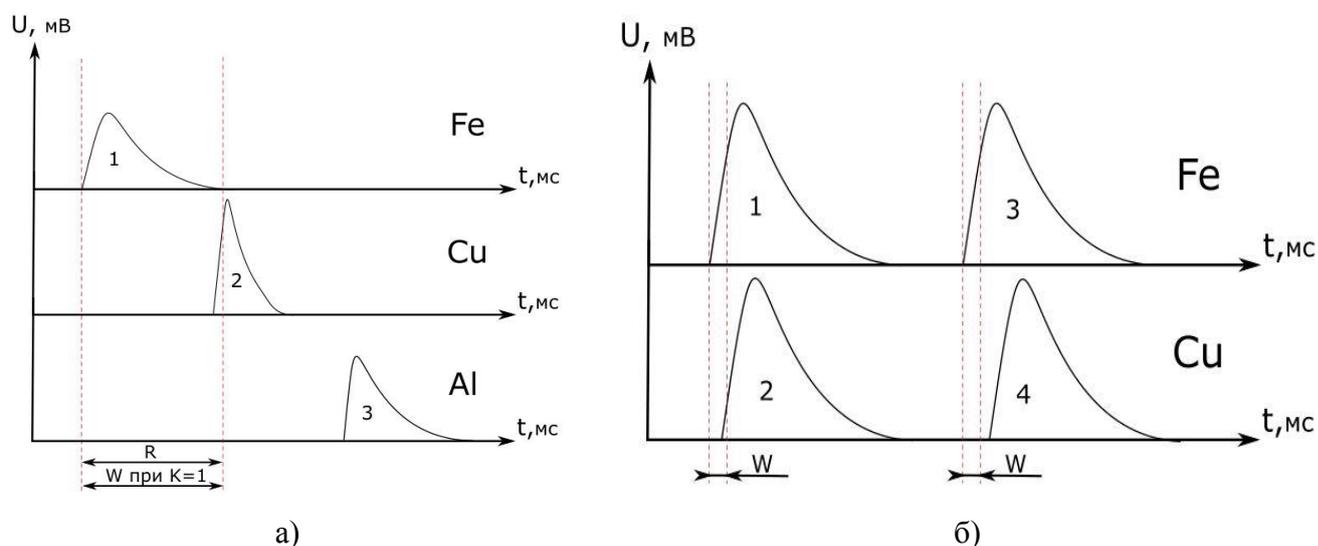


Рисунок 4 – Обработка импульсов импульсного сигнала: а) – зарегистрированного от частицы, состоящей из двух элементов Fe-Cu; б) – пример выделения двухкомпонентной частицы Fe-Cu (импульсы 1 и 2) и двух однокомпонентных частиц Fe и Cu (импульсы 3 и 4)

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.

С целью подтверждения влияния интервала совпадения фронтов импульсов на достоверность определения элементного состава, был поставлен эксперимент на одноэлементных порошках металлов. 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. 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».

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 3.

Таблица 3 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%.

Таблица 3 – 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 ГСО | 661 | 292 | 225 | 184 | 132 |
| | ГСО «Сочпи» | 2530 | 2493 | 2480 | 2469 | 2429 |
| Кол-во частиц , состоящих из 1-го элемента, см ⁻³ | Имитация ГСО | 10109 | 10871 | 11012 | 11098 | 11222 |
| | ГСО «Сочпи» | 5559 | 5766 | 5820 | 5892 | 6549 |
| Количество составов частиц , состоящих из 2-х и более элементов | Имитация ГСО | 48 | 45 | 42 | 40 | 31 |
| | ГСО «Сочпи» | 83 | 87 | 85 | 83 | 74 |

Количество частиц, состоящих из одного элемента в обоих пробах, изменилось одинаково, увеличилось приблизительно на тысячу. Это свидетельствует 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 частиц, состоящими из трех и более элементов, в имитации из двух элементов. При интервале совпадения 100 мкс произошло закономерное уменьшение количество составов части 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.

Результаты сравнительных измерений показали, 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 результатами микрорентгеноспектральных измерений.

Таким образом:

1. В конструкции распылителя с изогнутым капилляром под прямым углом возбуждаются поперечные колебания в горизонтальной части капилляра. При малых радиусах изгиба (0.5 мм, 1.0 мм, 2.0 мм) максимум напряжения приходится на область изгиба. При радиусах (3.0 мм, 5.0 мм, 8.0 мм) область максимального напряжения смещается в первую пучность от конца капилляра. В месте крепления распыляющего капилляра со смесителем напряжения минимальны.
2. 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. Новая конструкция УЗ распылителя с изогнутым капилляром обладает ресурсом работы не менее 2 500 часов, что сопоставимо с наработкой СВЧ генератора плазмы;

3. разработаны способ и устройство, устраняющие влияние вязкости масла на результаты измерений параметров частиц. Экспериментально установлено, что подогрев масла в распыляющем капилляре до $T=85^{\circ}\text{C}$ обеспечивает необходимое снижение вязкости масла для получения капель золь размером не более 50 мкм. На данный способ и устройство для его осуществления получен патент РФ на полезную модель.
4. 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%.
5. приведены сравнительные результаты микрорентгеноспектральных и СВЧ плазменных измерений в пробе, отобранной из маслосистемы авиационного двигателя с повреждением. Качественная близость полученных результатов свидетельствует о достоверности определения элементного состава частиц изнашивания СВЧ плазменным методом.

Глава 4 посвящена разработке экспериментальной методики диагностирования двигателей Д30–КП/КП–2 при проведении приемосдаточных испытаний по результатам измерения параметров частиц изнашивания СВЧ плазменным методом.

При выполнении совместных работ с ПАО «ОДК-Сатурн» на СВЧ плазменный анализ были направлены 247 проб масел и смывов с маслофильтра, отобранные из 83 двигателей Д30–КП/КП–2, прошедших приёмосдаточные испытания. Согласно действующей нормативной документации, по завершению приёмосдаточных испытаний замечаний к двигателям не имелось, все 83 двигателя были отправлены в эксплуатационные организации.

Предполагалось, что на этапе ПСИ разброс по параметрам частиц изнашивания от двигателя к двигателю, в частности, по размерам частиц изнашивания может быть значительным. С целью подтверждения данного предположения с некоторых проб смывов с маслофильтра проведены измерения размеров металлических частиц с помощью микрорентгеноспектрального анализатора JXA-8200.

На рисунках 5-7 показаны распределения металлических частиц изнашивания по размерам в пробах смывов двигателей Д-30КП/КП-2, прошедших ПСИ.

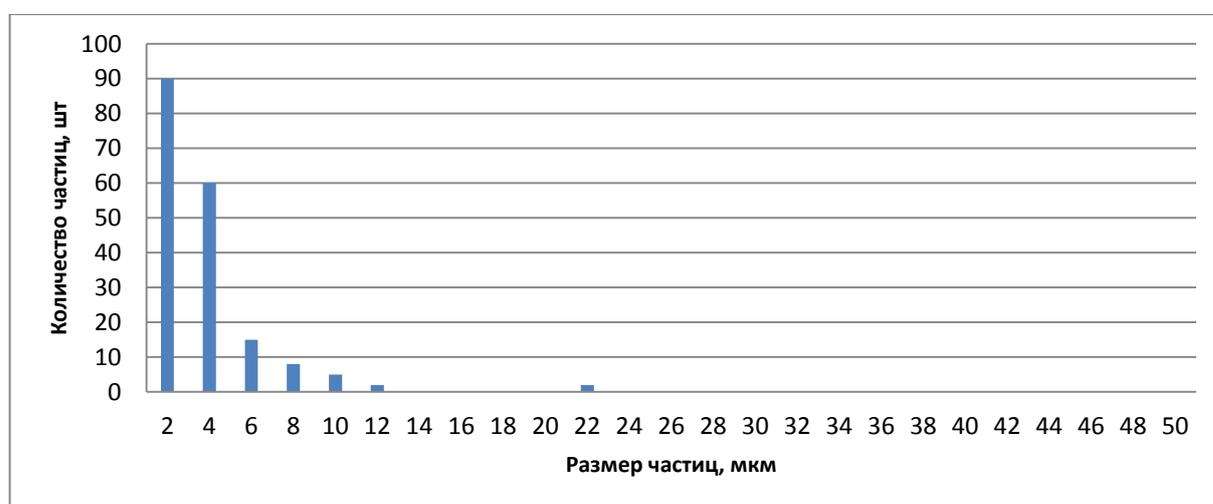


Рисунок 5 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смывых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 №190-041 после ПСИ, наработка – 5 часов 29 минут.

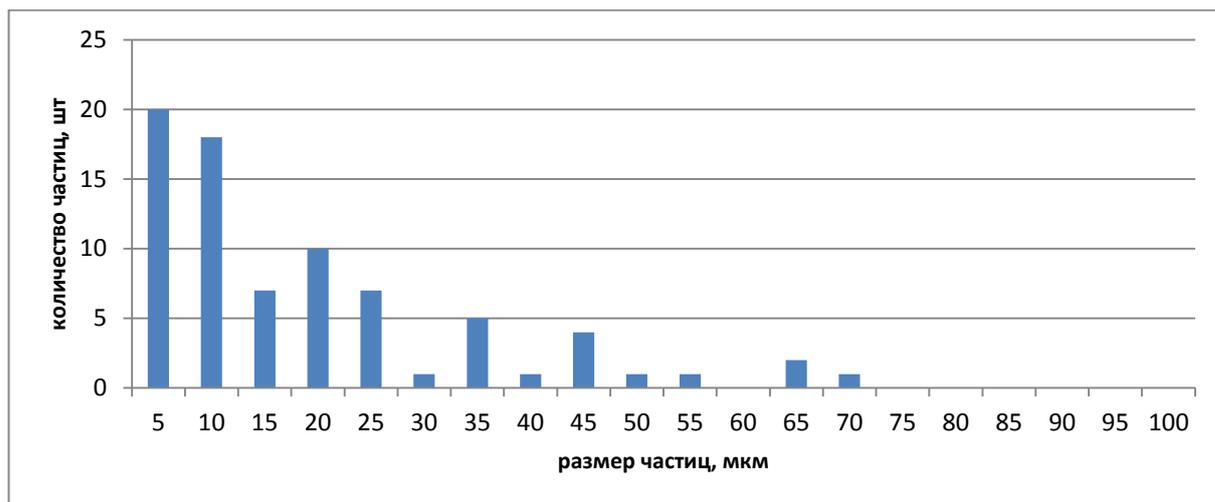


Рисунок 6 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 №187-021 после ПСИ, наработка – 7 часов 4 минуты.

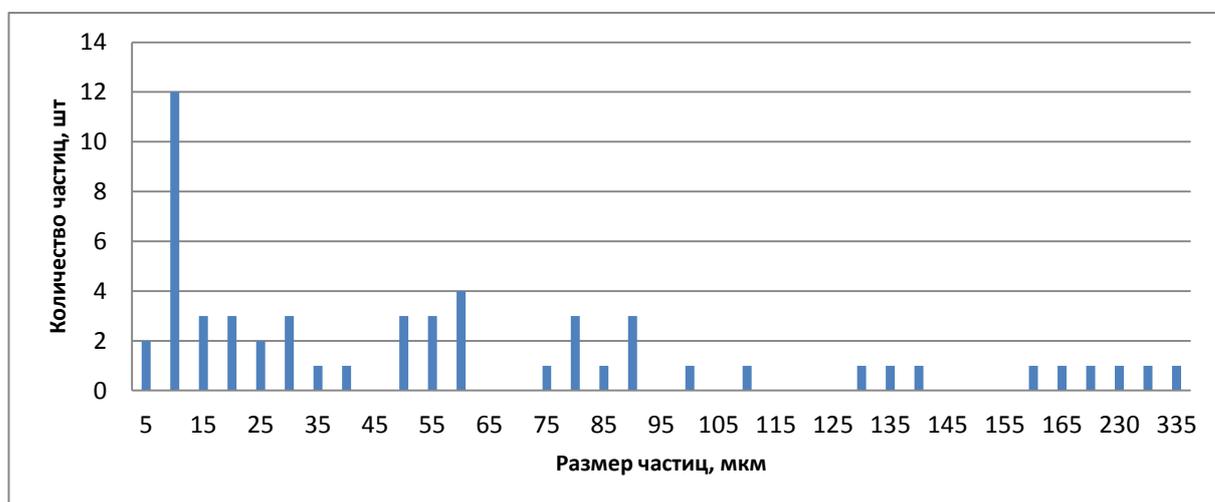


Рисунок 7 – Диаграмма распределения частиц по размерам, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 №42-085 после ПСИ, наработка – 6 часов 13 минут.

Из рисунков 5-7 видно, что для рассматриваемых двигателей, при сравнительно близких значениях наработки, распределения частиц по размерам значительно различаются. Так, распределения на рисунках 5-6 имеют ярко выраженный максимум, в то время как для двигателя №42-085 (см. рис. 7) 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.

Для оценки технического состояния двигателя при проведении ПСИ разработаны статистические эталонные модели по параметрам частиц изнашивания для ПКП, ЗКП и для смыва с маслофильтра.

С помощью разработанных моделей выявлено 11 двигателей, имевших повышенные параметры. Часть двигателей, превысивших параметры ($\bar{x} + 3\sigma$) представлены в таблице 5.

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. 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.

Таблица 5 – Состояние некоторых двигателей в эксплуатации, у которых после приёмосдаточных испытаний выявлены превышения по результатам СВЧ плазменного анализа.

| № | № двигателя | Превышения за 3σ в пробе смыва | Превышения за 3σ в пробе масла | Событие/Инцидент | Текущее состояние |
|---|-------------|--|---|---|---|
| 1 | 186-092 | Ag Cr-Ni- Cr-Ni-Fe-Al- Cr-Ni- Fe-Mg- Cr-Fe-Cu- | – | Снят в ремонт. Наработка ППР: 321ч. | на 1.12.2023 не предъявлен. Будет полностью исследован. |
| 2 | 37-729 | 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; | – | ИНЦИДЕНТ. Повреждение шлицов вала насоса ДЦН44С- ПЗТ и приводного валика на задней коробке приводов. Наработка ППР: 2078ч. | выполнен ремонт эксплуатируется |
| 3 | 189-021 | Cr; Al-Cu; | – | ИНЦИДЕНТ. Повреждение р/п ТВД Наработка ППР: 403ч. | выполнен ремонт эксплуатируется |
| 4 | 489-064 | – | Cr-Mg-Fe; Al-Cu; Cr-Cu; Ni-Cu; Cr- Mg-Cu; Al-Mg-Fe- Cu; Mg-Ag; Fe- Cu-Ag; | При наработке ППР: 105ч. Ушли превышения параметров | эксплуатируется |

В ходе эксплуатации, некоторые из двигателей с превышениями параметров были возвращены в ремонт.

Двигатель №186-092 снят в ремонт при наработке в 321ч., в настоящее время ожидает заводских исследований с полной разборкой двигателя;

У двигателя №189-021 при наработке 403ч. произошло повреждение р/п ТВД.

Для двигателя №37-729 инцидент произошёл при значительной наработке в 2078ч. Опыт диагностирования двигателей показал, что развитие повреждения по типу истирания развивается медленно и начало этих повреждений обнаруживается на этапе стендовых испытаний.

В пробе масла с двигателя №489-064 после ПСИ наблюдается большое количество превысивших параметров, которые вошли в норму при наработке 105ч. Это свидетельствует о том, что для этого двигателя процесс приработки полностью завершился за 105 ч.

Таким образом, использование СВЧ плазменного метода для контроля технического состояния узлов маслосистемы двигателей после ПСИ позволит выявлять скрытые повреждения уже на этапе стендовых испытаний, снизит число возвращаемых в ремонт двигателей и, в итоге, отразится на сокращении расходов на ремонт и обслуживание двигателей как для завода, так и для эксплуатанта.

Выводы по главе:

1. Установлено, что применение СВЧ плазменного метода при стендовых испытаниях новых авиадвигателей позволяет получать объективную информацию о техническом состоянии двигателя и выявить скрытые повреждения на раннем этапе.
2. Разработаны статистические модели исправного двигателя после ПСИ для разных точек отбора передней и задней коробок приводов (ПКП, ЗКП), пробы смыва с маслофильтра (МФС).
3. Разработанная экспериментальная методика апробирована при оценке технического состояния двигателей Д30–КП/КП–2 прошедших приемосдаточные испытания. Из 83 продиагностированных двигателей выявлено 11 двигателей с повышенными параметрами, в двух случаях было возможно предупреждение инцидента в начальный период эксплуатации двигателей.

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.

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.

Благодарности

Автор выражает благодарность Казмирову А. Д. за помощь в расчетах и математическом моделировании; Карасёвой Е. Н. за помощь в проведении экспериментов; Кузнецову А. А., Бельских А. В., Скудаеву Ю. Д., за ценные замечания к работе.

Список использованной 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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

Публикации автора по теме диссертации

Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (6):

1. Мурыщенко, В. В. 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 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84. – № 8. – С. 39-43.
2. Мурыщенко, В. В. Разработка ультразвукового распылителя СВЧ-плазменного комплекса для анализа авиационных масел / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, А. Д. Казмиров, Е. Н. Карасева, В. В. Мурыщенко, Ю. Д. Скудаев // Контроль. Диагностика. – 2023. – Том 26. – №5 – С. 42–49.
3. Мурыщенко, В. В. Использование способов машинного обучения при оценке технического состояния узлов маслосистемы газотурбинных двигателей при СВЧ плазменных измерениях. / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко, А. Ю. Ходунаев // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2019. – № 27. – С. 120–130.

4. Мурыщенко, В. В. 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.
5. Мурыщенко, В. В. Результаты определения элементного состава металлических частиц изнашивания в пробах авиационных ГТД, измеренные СВЧ плазменным и электронно-зондовым микрорентгеноспектральным (ЭРСМА) методами анализа / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко, Л.А. Павлова, Ю. Д. Скудаев // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2020. – № 33. – С. 58–68.
6. Мурыщенко, В. В. Оценка состояния смазываемых узлов трения авиационных двигателей Д-30КП/КП-2 при приёмо-сдаточных испытаниях / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, А. Д. Казмиров, А. А. Элькес // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2024. – № 46. – С. 20–31.

**В изданиях, входящих в международную базу
цитирования «Scopus» (3):**

7. Myrishenko, V. V. Technical state evaluation of oil-lubricated parts and units of aircraft gas turbine engines using microwave plasma method / V. G. Drovkov, V. V. Drovkov, N. A. Ivanov, V. V. Myrishenko, Y. D. Skudaev, A. Y. Hodunaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012058.
8. Myrishenko, V. V. Development of microwave plasma method for measurement of wear particle parameters in lubricant oil samples from aircraft gas turbine engines / V. G. Drovkov, V. V. Drovkov, N. A. Ivanov, V. V. Myrishenko, Y. D. Skudaev, A. Y. Hodunaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012059.
9. Myrishenko, V. V. Ultrasonic sprayer of liquid samples for atomic-emission microwave plasma analyzer / V. G. Drovkov, V. V. Drovkov, A. E. Kaloshin, V. V. Myrishenko, Y. D. Skudaev, A. Y. Hodunaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012060.

Публикации в трудах международных конференций (4):

1. Мурыщенко, В.В. Измерение массовой доли металлической примеси в жидких пробах при сцинтилляционном способе анализа. / В.Г. Дроков, В. Вл. Дроков, Н.А. Иванов, В.В. Мурыщенко, Ю.Д. Скудаев // XVI Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности»: мат. XVI международ. симп. (Новосибирск 14-16 августа 2018 г.) Академпарк – Новосибирск, 2018. – С. 76–82.
2. Мурыщенко, В.В. Разработка эталонной математической статистической модели по параметрам частиц изнашивания для оценки состояния двигателей Д-30КП/КП-2, прошедших приемосдаточные испытания (ПСИ). / Дроков В.Г., Дроков В.В., Мурыщенко В.В., Элькес А.А. // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering : мат. XVI международ. научно-практической конф. (Иркутск 3-7 июля 2023 г.) / Технопарк «ИРНИТУ» – Иркутск, 2023. – С. 144–152.
3. Мурыщенко, В.В. СВЧ-плазменный анализатор для измерения параметров частиц изнашивания и диагностирования двигателей различного назначения. / Дроков В.Г., Дроков В.В., Казмиров А.Д., Мурыщенко, В.В. // V всероссийская научно-техническая

конференция с международным участием «Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств» : мат. V всероссийской научно-технической конф. с международным участием (Омск 14 декабря 2023 г.) / ОмГУПС – Омск, 2023. – С. 68–84.

4. Мурыщенко, В.В. Способ снижения влияния частиц изнашивания на аналитический сигнал при оценке технического состояния двигателя СВЧ плазменным (сцинтилляционным) методом / Дроков В.Г., Казмиров А.Д., Карасева Е.Н., Мурыщенко В.В. // V всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств» : мат. V всероссийской научно-технической конф. с международным участием (Омск 14 декабря 2023 г.) / ОмГУПС – Омск, 2023. – С. 85–96.

В прочих изданиях (7):

5. Патент № 185308 U1 Российская Федерация, МПК G01J 3/443 (2006.01). Устройство позиционирования распыляющей системы : № 2018120973 : заявл. 06.06.2018 : опубл. 29.11.2018 / В. В. Мурыщенко [и др.] ; патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – 7 с. : ил.
6. Патент № 187161 U1 Российская Федерация, МПК B05B 17/06 (2006.01). Ультразвуковой распылитель : № 2018147450 : заявл. 29.12.2018 : опубл. 21.02.2019 / В. В. Мурыщенко [и др.] ; патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – 7 с. : ил.
7. Патент № 193261 U1 Российская Федерация, МПК B05B 17/06 (2006.01). Ультразвуковой распылитель : № 2019124700 : заявл. 05.08.2019 : опубл. 21.10.2019 / В. В. Мурыщенко [и др.] ; патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – 7 с. : ил.
8. Патент № 193338 U1 Российская Федерация, МПК B05B 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.
9. Патент № 2711372 C1 Российская Федерация, МПК G01N 31/02 (2006.01), G01N 15/02 (2006.01). Способ измерения размеров капель масла : № 2018143519 : заявл. 10.12.2018 : опубл. 16.01.2020 / Дроков В. В., Мурыщенко В. В., Скудаев Ю. Д., Ходунаев А. Ю ; патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – 8 с. :ил.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662642 Российская Федерация. Программа для измерения капель 1.0.0. : № 2019661120 : заявл. 12.09.2019. : опубл. 27.09.2019 / Мурыщенко В. В., Ходунаев А. Ю.
11. 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.