

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-1-1-36-46

УДК (UDC) 543.422.8

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАСЛОСИСТЕМЫ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТРИБОДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

© В. Г. Дроков¹, В. В. Дроков¹, Ф. И. Мухутдинов²

¹ НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, г. Иркутск, Россия; e-mail: dtech@api.isu.ru

² АО «ОДК «Авиадвигатель», г. Пермь, Россия.

Статья поступила 19 апреля 2017 г.

Представлены результаты оценки технического состояния узлов трения, омываемых смазочным маслом, авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) по данным измерения параметров частиц изнашивания спектральными и феррографическими методами. Показано, что вследствие конструктивных особенностей маслосистемы ГТД анализ пробы масла не дает достаточной информации об уровне износа узлов трения. Увеличение диагностических параметров (определение содержания частиц, их размеров и форм) также не приводит к существенному повышению достоверности диагностики. Для получения полной информации об износных процессах в двигателе необходимо анализировать пробу смыва с маслофильтра. При этом достижение необходимой точности диагностики возможно в случае оценки параметров частиц изнашивания во всем возможном диапазоне их изменения. Отмечено, что проблема периодичности диагностирования ГТД с одноразовыми тонкоячеистыми маслофильтрами, имеющими ресурс 600 и более часов, решается использованием маслофильтров с диагностическим слоем. Оценены диагностические возможности ряда перспективных методов контроля и прогноза состояния маслосистемы авиационных ГТД.

Ключевые слова: атомно-эмиссионный анализ частицы изнашивания; диагностика; маслосистема двигателя; рентгенофлуоресцентный анализ; фильтроэлемент; анализ пробы масла; анализ пробы смыва; достоверность диагностического решения; диагностический признак; газотурбинный двигатель.

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF INCREASING THE RELIABILITY OF TRIBODIAGNOSTICS IN ASSESSING TECHNICAL CONDITIONS OF THE OIL LUBRICATION SYSTEMS OF GAS-TURBINE AIRCRAFT ENGINES

© V. G. Drovok, V. V. Drovok, and F. I. Muhutdinov

Submitted April 19, 2017.

The issues regarding the reliability of assessing health of the oiled joints of aircraft gas turbine engines (GTE) proceeding from the results of spectral and ferrographic measurement of the parameters of wear particles are considered. It is shown that, due to design features of the oil system analysis of the oil sample does not provide enough information about the wear processes in the GTE joints. Growth of the number of diagnostic parameters (particle concentration, form and size) does not significantly increase the reliability of health assessment, whereas analysis of the oil filter wipe sampling provides full information about engine wear processes. The main measurement instrumentation requirements are considered. High reliability of diagnostic results can be attained when the parameters of wear particles are measured over the full range of their variation. Issues regarding the recurrence of engine health assessment in case of using fine-meshed oil filter with 600-h lifetime are discussed. The use of expendable oil filters with a diagnostic layer can solve the problem. Diagnostic potentials of some promising methods of assessment and prognosis of the oiling system health in aircraft GTE are evaluated.

Keywords: atomic emission analysis of wear particles; diagnostics; engine oiling system; x-ray fluorescence analysis; filter element; oil sample analysis; oil filter wipe sampling; diagnostics reliability; diagnostic feature; gas turbine engine.

Согласно статистическим данным наибольшее число авиапроисшествий (до 40 %) связано с проблемами в авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) [1]. При этом чаще всего аварии вы-

званы наличием посторонних частиц в маслосистеме ГТД. Используемые в настоящее время инструментальные методы диагностики параметров частиц изнашивания (атомно-эмиссион-

ный, рентгеноспектральный, феррографический), предназначенные для обнаружения дефектов на ранней стадии развития, в подавляющем большинстве случаев не позволяют делать прогнозы по работе двигателя при диагностировании металлических частиц, отделяемых от повреждаемых деталей.

Сейчас в гражданской авиации и Вооруженных силах эксплуатируются ГТД, выпущенные в основном 15–30 лет назад. Значительная их часть выработала назначенные и межремонтные ресурсы и сроки службы. Поэтому актуальна разработка эффективных методов диагностики, позволяющих снизить риски возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов. Двигатели нового поколения (например, ПС-90А, ПД-14) также требуют современных подходов к проблеме контроля, диагностики и управления их техническим состоянием.

Большинство эксплуатантов оценивает техническое состояние узлов ГТД, омываемых маслом, по размеру и форме металлических частиц, уловленных магнитными детекторами стружки (МДС). Однако двигатель содержит достаточно большое количество узлов и соединений, частицы износа которых не улавливаются МДС (сплавы титана, меди, магния и др.). К тому же обнаружение стружки на МДС зачастую означает значительное разрушение узла и вывод двигателя из эксплуатации, что существенно повышает стоимость будущего ремонта.

Последние 15–20 лет для анализа проб масел используют разнообразную аппаратуру: дуговые атомно-эмиссионные спектрометры (МОА, Spectroil, МФС, ICP), рентгеновские установки (БАРС, X-50, СПЕКТРОСКАН, ПРИЗМа) и микроанализаторы, электронные, сканирующие микроскопы, феррографы различных модификаций, счетчики частиц (LaserNet, Metalscan). Однако с помощью атомно-эмиссионного спектрометра и феррографа еще ни разу не удалось выявить, например, дефект роликоподшипника турбины высокого давления (ТВД).

Проблема инструментальной диагностики узлов и агрегатов ГТД, омываемых смазочным маслом, приобрела особенную актуальность с использованием в двигателях тонкоячеистых фильтров типа PALL QA07-930. Применение таких фильтроэлементов привело к тому, что лишь в исключительно редких случаях результаты анализа пробы масла позволяли выявить дефект (до сих пор на анализ проб масла действуют нормативы 20-летней давности [2–6]).

Таким образом, традиционные подходы, используемые для диагностики технического состояния узлов трения ГТД, не обеспечивают до-

статочной надежности получаемых результатов. Это привело к тому, что наличие неисправности в двигателе чаще всего констатируется, а не предупреждается. Неисправность ведет к разрушению не только узлов системы смазки, но и сопряженных механизмов, а работы по профилактике подобных дефектов — к необоснованному «утяжелению» эксплуатационной документации, увеличению количества предполетных осмотров. В конечном итоге это снижает конкурентоспособность двигателя.

Цель работы — анализ возможности использования трибодиагностических методов контроля для оценки технического состояния маслосистемы авиационных ГТД.

Содержание металлической примеси в пробе масла как диагностический признак при оценке технического состояния ГТД

Для оценки технического состояния маслосистемы авиационных ГТД наибольшее распространение получили спектральные методы анализа. Техническое состояние двигателя оценивают по содержанию металлической примеси в пробе масла (увеличение содержания свидетельствует о возникающих проблемах в узлах трения) [7–10].

Уравнение материального баланса частиц изнашивания имеет следующий вид [10]:

$$\frac{dC}{dt} + \frac{V\gamma(C, t)C}{V_0 - gt} = \frac{m(t)}{V_0 - gt}, \quad (1)$$

где m — скорость образования частиц изнашивания; V_0 и V — начальный объем масла в маслосистеме двигателя и в момент времени t ; g — величина утечки масла из маслосистемы; γ — эффективность фильтрации; C — содержание металлической примеси.

Уравнение (1) имеет следующее решение:

$$C_p = \frac{V_m}{\gamma V}, \quad (2)$$

где C_p — величина равновесного содержания, зависящая от скорости изнашивания (V_m), эффективности фильтрации (γ) и расхода масла (V) и не зависящая от времени наработки двигателя. Иными словами, в исправном двигателе C_p — величина постоянная.

Видно, что при постоянных значениях характеристик маслофильтра и расхода масла увеличение C_p может произойти только за счет роста скорости образования частиц изнашивания, что свидетельствует о возникновении повреждения в двигателе, т.е. по проходящим через

фильтр частицам согласно (2) можно с достаточной уверенностью оценить техническое состояние ГТД.

Уравнение (2) учитывает только характеристику маслосистемы и скорость образования частиц. Однако при анализе дисперсно-распределенной примеси в пробе должны приниматься во внимание аналитические возможности измерительной аппаратуры и физико-химические характеристики пробы (в частности, вид функции распределения частиц по размерам) [11].

С учетом аппаратурных возможностей и физико-химических характеристик проб запишем [12]:

$$K = \frac{\int_{D_1}^{D_2} D^3 F(D, \mu, \delta) dD}{\int_0^{\infty} D^3 F(D, \mu, \delta) dD}, \quad (3)$$

где $F(D, \mu, \delta) = P(D)$ — плотность вероятности; D — размер частиц износа; μ, δ — параметры распределения.

Видно, что коэффициент пропорциональности K зависит от диапазона размеров измеряемых частиц и будет меняться от прибора к прибору (если диапазоны у них отличаются). Если в процессе эксплуатации двигателя меняется функция распределения частиц по размерам, то K зависит от интервала времени между отборами проб. В этом случае изменение содержания частиц износа (скорость нарастания) зависит от измерительного прибора и, как следствие, не будет напрямую связано с интенсивностью износа деталей ГТД.

Следовательно, при возникновении повреждения коэффициент пропорциональности равен единице в случаях, когда прибор может регистрировать весь диапазон размеров частиц, генерируемых в системе смазки двигателя, либо когда вид функции распределения не меняется со временем (наработкой двигателя). В этом случае в качестве диагностических равноценных параметров при анализе пробы масла можно использовать содержание и количество частиц данного элемента. При этом отсутствует необходимость измерения абсолютного (истинного) значения диагностического параметра, достаточно отследить изменение параметра относительно предыдущего измерения.

Аналитические и диагностические возможности спектральных и феррографических исследований при анализе содержания металлической примеси в пробе масла

Параметр «содержание примеси» может быть достоверным диагностическим признаком в случаях, когда с развитием дефекта функция распределения частиц по размерам остается неизменной либо когда измерительный прибор позволяет определять содержание металлических частиц с минимальной погрешностью во всем диапазоне изменения их размеров.

Атомно-эмиссионный метод. Наибольшее распространение для диагностики маслосистемы авиационных ГТД получили атомно-эмиссионные спектрометры со способом подачи пробы масла в дуговой разряд методом вращающегося электрода [3, 13].

Данные по изучению влияния размеров частиц для проб масел с изменяющимся гранулометрическим составом наглядно показали, что интенсивность аналитического сигнала и наклон градуировочного графика зависят от размеров частиц определяемого элемента (начиная с 8–10 мкм). При размерах частиц более 10 мкм результаты определения содержания металлов в пробе масла значительно занижаются [14, 15]. При этом несоответствие по размерам металлической примеси в стандартном образце (СО) и анализируемой пробе может приводить к систематическим погрешностям при определении содержания [14], что в нормативных документах не учитывается [3].

В нормативной документации граничные значения по содержанию, при которых двигатель может (или не может) эксплуатироваться, даны только для двух элементов — железа и меди [4]. Между тем МФС, Spectroil и другие типы атомно-эмиссионных спектрометров имеют возможность одновременного определения до 20 элементов.

При «прямых» измерениях металлической примеси, т.е. без предварительной пробоподготовки (обогащения), предел определения по меди и железу в пробах масел составляет порядка 1 ppm [16–18]. В конструкции ГТД используются сплавы на основе железа, содержание легирующих добавок (например, Cr, Ni, V) в которых в 10–100 раз меньше содержания железа. Отсюда следует, что для уверенного определения содержания легирующих компонентов необходимо снижение пределов обнаружения в используемых спектрометрах минимум на 2–3 порядка.

Исследовали пробы масел, содержащие износные частицы, смытые с маслофильтров

МФС-30 (точность фильтрации — 70 мкм) исправных ГТД Д-30КП/КУ/ КУ-154 [19]. Как и предполагали, результаты определения содержания железа и меди на спектрометрах МОА и Spectroil оказались заниженными в 2 – 2,5 раза в рабочем диапазоне измерений (C_{Fe} и $C_{Cu} \geq 1$ г/т), а по алюминию — в 8 – 10 раз. Содержание легирующих элементов (Cr, Ni, V) практически не определяется, поскольку оно намного меньше пределов обнаружения приборов [19].

Как и большинство спектральных методов, атомно-эмиссионный метод относителен, поэтому для измерения содержания (массовой доли) примеси в пробе масла необходима его калибровка с помощью СО. СО для калибровки готовят на окислах металлов, которые перетирают в ступке в течение 3 ч (размер частиц не более 5 мкм) [5]. Далее в 4 – 5 колб, заполненных одинаковым объемом «чистого» масла, добавляют расчетные навески порошка. Каждая колба с порошком обрабатывается на ультразвуковом (УЗ) диспергаторе, после чего проводят калибровку спектрометра.

У исправных двигателей в пробах масла отсутствуют частицы размером более 3 мкм [20]. Следовательно, подготовленный описанным выше способом СО по размерам частиц соответствует анализируемой пробе, и величина погрешности измерения содержания должна быть небольшой (обусловлена в основном формой примесных частиц и инструментальной погрешностью).

Как показывает практика, спрогнозировать отказ двигателя можно в случаях, когда дефект развивался постепенно в течение нескольких дней (т.е. изменение содержания примеси надежно определяется). Однако подобных случаев от общего числа дефектных ГТД немного (около 5 – 7 %) [21]. В остальных двигателях дефект выявляют по наличию стружки на МДС, фильтрах-сигнализаторах (ФС) и по повышению вибрации.

Поскольку количество случаев, когда дефект в двигателях Д-30КП/КУ/КУ-154 развивается достаточно медленно, не превышает 7 %, то достоверность диагностики по результатам измерения содержания примеси в пробе масла методом вращающегося электрода составляет также порядка 7 %.

Заметим, что способ введения пробы в разряд с помощью вращающегося электрода был изначально предложен для анализа растворов. Поэтому использование его для исследования проб масел, содержащих примеси в виде износных металлических частиц сложного и к тому же меняющегося гранулометрического состава, по-видимому, не до конца обоснованно [3]. Подача пробы в дуговой разряд вращающимся электродом может

приводить к существенным погрешностям в измерениях массовой доли в случаях изменения вида распределения частиц изнашивания по размерам и, соответственно, к ошибочным диагностическим решениям.

При использовании атомно-абсорбционного анализа снимается проблема влияния размеров частиц на результаты измерений [22]. Низкие пределы обнаружения за счет экстрагирования элементов из раствора также достижимы. Тем не менее длительность и трудоемкость подготовки пробы, небольшое количество одновременно измеряемых элементов (3 – 5), высокая стоимость анализа ограничивают возможности атомной абсорбции при оценке технического состояния ГТД.

Рентгенофлуоресцентный метод. При оценке технического состояния маслосистемы ГТД наряду с атомно-эмиссионным методом используют рентгенофлуоресцентный способ анализа.

В рентгеноспектральном анализе, как и в атомно-эмиссионном, основное условие точности результатов измерения содержания металлической примеси — соответствие по физико-химическим свойствам СО и анализируемой пробы. Согласно принятой методике [23] градуирование рентгеновских анализаторов осуществляют СО, приготовленными на основе измельченных окислов металлов [6]. При этом влияние несоответствия СО анализируемой пробе на величину флуоресценции не учитывают.

Результаты расчетов интенсивности сплошного ненасыщенного медного слоя различной поверхностной плотности показали [24], что рост интенсивности существенно отстает от увеличения поверхностной плотности, в то время как линейная зависимость интенсивности от числа частиц заданной крупности должна нарушаться только при появлении следующего слоя этих частиц. Так, при изменении поверхностной плотности в 8 раз интенсивность флуоресценции увеличивается в 1,5 раза, что свидетельствует о значительном влиянии размеров частиц на данные рентгенофлуоресцентных измерений.

Кроме размеров частиц на измерение массовой доли влияет процесс подготовки пробы к анализу. Очевидно, что при осаждении пробы масла на мембранный фильтр часть частиц уходит в слив, соответственно, судить об износных процессах в двигателе в полной мере невозможно. Так как наперед неизвестен тип развития дефекта, величина измеренного рентгенофлуоресцентным методом содержания может не коррелировать с техническим состоянием системы смазки ГТД.

В табл. 1 приведены результаты атомно-эмиссионных и рентгенофлуоресцентных изме-

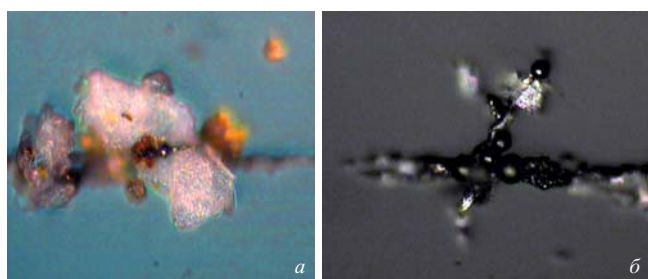


Рис. 1. Фрагмент феррограммы пробы масла с находившегося на стендовых испытаниях двигателя (режим «Реверс», наработка 348 ч): *а* — кварцевая частица с впаянными в нее шарообразными металлическими включениями (диаметр около 1 мкм); *б* — отдельные, сравнительно крупные (до 5 мкм) шарообразные металлические включения

рений содержания меди в пробах масла, отобранных при отработке двигателя ТВ7-117 на стенде в процессе циклических испытаний [25]. Каждой пробе соответствует определенная наработка двигателя в часах. На анализаторах БАРС-ЗДА, ПРИЗМа и СПЕКТРОСКАН замеряли одни и те же отпечатки масла на фильтрах. ПРИЗМу градуировали по ионным СО, БАРС и СПЕКТРОСКАН — по измельченным оксидам меди, спектрометры МОА и Spectroil — по СО Conostan.

Видно, что атомно-эмиссионные спектрометры показывают значительные содержания меди в пробах, в то время как рентгенофлуоресцентные анализаторы — результаты, близкие к нулевым. Такое отличие можно объяснить спецификой процесса подготовки пробы к тому или другому анализу.

Полученные данные (см. табл. 1) свидетельствуют, что рентгенофлуоресцентные анализаторы следует использовать для измерения проб масел с большей осторожностью, поскольку заранее неизвестно количество металла, проходящего через микрофильтр в слив. Если дефект развивается по схеме выделения тонкодисперсной фракции, то он может быть пропущен.

Независимо от типа анализатора общий их недостаток (с точки зрения диагностики) — не-

возможность учета влияния способа пробоподготовки и размеров частиц на результат измерений. В этой связи представляется, что одно из направлений более эффективного применения рентгенофлуоресцентного метода в трибодиагностике ГТД — определение с его помощью элементного состава отдельных частиц, уловленных МДС. Установив марку сплава частиц изнашивания, можно определить источник разрушения [26].

Феррографический метод. Дополнительные данные о параметрах частиц изнашивания можно получить, используя феррографический способ анализа. Форма и размер частиц позволяют установить тип изнашивания, который свидетельствует о серьезности возникшего дефекта [10, 27].

Один из наиболее опасных и распространенных дефектов узлов трения при качении — усталостное выкрашивание контактных поверхностей [28]. При этом преимущественно образуются сферические частицы износа размером 2 – 5 мкм, которые могут служить диагностическим признаком начала процесса выкрашивания и могут быть обнаружены феррографическим способом.

На рис. 1 представлен фрагмент феррограммы с двигателя, находившегося на длительных стендовых испытаниях. Ясно видны крупные (до 50 мкм) кварцевые частицы с впаянными в них шарообразными металлическими включениями. Идеальная форма и зеркальная поверхность включений свидетельствуют о том, что они образовались, вероятнее всего, из капель расплава в жидкости (масле) под действием сил поверхностного натяжения.

В данном случае (см. рис. 1) обнаружены частицы тяжелого износа, которые, казалось бы, характеризуют начало выкрашивания [28], однако в реальности выявить его не удалось [29]. В дальнейшем двигатель отработал без замечаний еще 7972 ч. Отсюда следует, что наличие сферических частиц микронных размеров в пробе масла

Таблица 1. Результаты измерений содержания меди (ppm) в пробах масла двигателя ТВ7-117 [25]

Проба	Атомно-эмиссионный спектрометр			Рентгенофлуоресцентный анализатор		
	МОА	SpectrOil	МФС-5	БАРС-ЗДА	ПРИЗМа	SpectroScan
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	—

еще не предвестник обязательного возникновения в скором времени дефекта. Исходя из факта длительной работы двигателя, можно предположить, что если в начальный период и образовались микротрещины, то затем произошла их локализация и дефект не получил развития. Либо, что более вероятно, механизм образования сферических включений не всегда связан с процессом выкрашивания.

Усталостное выкрашивание, кроме сферических частиц, может характеризоваться и частицами в форме плоских пластин с гладкой поверхностью размером от 10 мкм и более [10, 27]. Вместе с тем частицы нормального изнашивания также могут иметь форму пластин размером до 20 мкм. Такое совпадение затрудняет выявление дефекта на ранней стадии развития.

С большой долей вероятности можно предположить, что подобные наложения возможны и при других типах изнашивания, что значительно усложняет постановку достоверного диагноза.

Дополнительный фактор, влияющий на принятие правильного диагностического решения, — механизм развития усталостного выкрашивания контактных поверхностей. Частицы износа при усталостном выкрашивании могут поступать в маслосистему двигателя импульсно, отдельными порциями через неопределенные промежутки времени [28, 30]. Поэтому обнаружить момент начала выкрашивания спектральным методом при периодическом отборе проб масла практически невозможно. Даже если пробу отбирают в момент выкрашивания, результат спектрального анализа можно расценить как ошибочный, поскольку измеренные в последующих пробах содержания металлов могут быть не критичными [28]. При этом время развития дефекта также неизвестно.

Подводя итог по традиционным подходам в трибодиагностике ГТД, выделим несколько главных моментов: 1) спектральные методы (атомно-эмиссионный и рентгенофлуоресцентный) подвержены существенному влиянию размеров частиц при измерении содержания металлов. По содержанию металлических частиц изнашивания в пробе масла можно достоверно оценить техническое состояние системы смазки ГТД в случаях, когда вид функции распределения частиц по размерам не меняется (либо слабо меняется) с развитием повреждения; 2) число случаев выявления дефектов с помощью рентгенофлуоресцентных анализаторов для двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 (частота отбора проб масла через 50 ч) составляет не более 7 % от общего числа дефектных двигателей; 3) определение содержания металла необходимо, но не достаточно для принятия правильного диагностического ре-



Рис. 2. Структурная схема подачи смазочного масла к основным агрегатам двигателя

шения; 4) увеличение числа диагностических параметров при анализе пробы масла (учет содержания, размеров и формы частиц) не приводит к существенному росту достоверности диагностики (например, дефекты трансмиссионной части ГТД ни разу не были выявлены атомно-эмиссионным и феррографическим методами анализа [31 – 33]).

Влияние точки отбора пробы масла на достоверность результатов измерения содержания примеси

На практике не редки случаи, когда результаты измерения параметров частиц свидетельствовали об исправности ГТД, но тем не менее двигатель приходилось выводить из эксплуатации из-за разрушения какого-либо узла.

Как известно, феррография — визуальный способ измерения параметров частиц износа. В этой связи возникает ряд вопросов: почему дефекты некоторых узлов ГТД достаточно уверенно обнаруживаются феррографией, а дефекты других (межвального роликоподшипника, подшипника ТВД и др.) не фиксируются? Почему при разрушении подшипника ТВД, когда стружка в большом количестве обнаруживается на магнитных пробках, феррография «не видит» критических частиц, а спектральный метод показывает содержания значительно ниже предельных?

Рассмотрим структурную схему подачи смазочного масла к основным агрегатам двигателя (рис. 2).

Масло из маслобака через нагнетающую ступень подводится к основному масляному фильтру. После маслофильтра масло параллельно разводится и подается на агрегаты 1 и 2. Далее оно возвращается в маслобак.

Видно, что в случае, когда агрегаты исправны, а дефект начал развиваться (например, в роликоподшипнике ТВД), часть масла, в которой содержатся характеризующие дефект частицы износа, поступает в маслобак на основной маслофильтр, откуда уже очищенное масло подается вновь на агрегаты. При этом на спектральный анализ берут пробу очищенного масла, прошедшего через маслофильтр. Отсутствие частиц износа в пробе при наличии дефекта можно объяснить только одним: металлические частицы полностью улавливаются основным маслофильтром. Лишь в отдельных случаях неисправность агрегатов при срабатывании перепускного клапана может быть подтверждена результатами спектрального и феррографического анализов.

Очевидно, что при возникновении медленно развивающегося дефекта в агрегате 1 (центральный привод, роликоподшипник компрессора высокого давления, зубчатые колеса, подшипники коробки приводов и др.), масло с которого поступает в коробку приводов, не доходя до основного маслофильтра, его можно выявить феррографическим и спектральным способами.

Адекватно оценить техническое состояние маслосистемы ГТД можно только при одновременном учете параметров как частиц износа, находящихся в пробе масла, так и частиц, уловленных основным маслофильтром [34].

Для предотвращения вторичного повреждения узлов двигателя продуктами износа в современных ГТД устанавливают фильтроэлемент с толщиной фильтрации около 15 мкм, который осаждает более 95 % частиц. В этом случае понятно, что анализ пробы масла, слитого с коробки приводов или маслобака, не требуется.

Преимущества фильтроэлемента следующие: 1) за счет того, что пропускная способность фильтроэлемента позволяет проходить через него всей рабочей жидкости, рабочая поверхность со временем улавливает значительно большее количество частиц изнашивания по сравнению с МДС, ФС, МСС; 2) фильтроэлемент осаждает как металлическую, так и неметаллическую стружку.

Контроль состояния узлов трения ГТД, омываемых смазочным маслом, по анализу смыва с маслофильтра

Трибологический ресурс авиационных двигателей во многом определяется чистотой рабочей жидкости. Так, повышение толщины фильтрации смазочного масла с 40 до 3 мкм позволяет увеличить относительную долговечность подшипников более чем на порядок [35]. Вместе с тем при такой толщине фильтрации (3 мкм) оце-

нить износные процессы в ГТД по результатам анализа пробы масла фактически невозможно.

При использовании для диагностики МДС повреждения часто фиксируют непосредственно перед или во время разрушения того или иного агрегата или узла [31]. Инструментальный анализ частиц, уловленных маслофильтром, позволяет обнаружить дефект раньше, чем по результатам исследования пробы масла либо частиц, смытых с МДС [32]. Поэтому в последние годы усилия разработчиков направлены на создание и совершенствование технологий оценки технического состояния системы смазки ГТД по результатам анализа смыва с маслофильтра.

Проблему периодичности отбора пробы, получения смыва и его анализа решают по-разному. Так, например, на двигателях фирмы Rolls-Royce, оснащенных объемным (вместо сетчатого) фильтроэлементом QA-07930 (тонкость фильтрации менее 15 мкм), анализ частиц, уловленных фильтроэлементом, проводят после того как обнаружат стружку на МДС [33]. При обнаружении стружки фильтроэлемент снимают, разбирают. Вырезанную часть его диагностического слоя исследуют. По изменению количества и размеров частиц судят о техническом состоянии двигателя. С помощью микрорентгеноспектрального анализа определяют тип сплава изнашиваемого узла.

Иными словами, в качестве диагностических параметров при исследовании частиц, уловленных фильтроэлементом, используют количество частиц и их элементный состав. Увеличение количества свидетельствует о развитии дефекта, а элементный состав — об изнашиваемом узле.

Помимо визуальной оценки параметров частиц используют инструментальный метод оценки технического состояния узлов двигателя, омываемых маслом [15, 30, 35]. Для этого применяют системный модуль (счетчик MetalScan), позволяющий оценивать количество частиц и измерять рентгенофлуоресцентным способом массовую долю примеси в пробе смыва. При рентгенофлуоресцентных измерениях пробу пропускают через мембранный фильтр с размерами пор 100 мкм. Таким образом, частицы менее 100 мкм уходят в слив и не учитываются при принятии диагностического решения.

Данный подход показал свою эффективность при диагностике, например, роликоподшипника ТВД (ранее выявить дефект по результатам анализа пробы масла атомно-эмиссионным методом с вращающимся электродом не удавалось) [30]. Достоверность результатов диагностирования составила около 95 % [35].

В последние годы разрабатывается и внедряется технология диагностирования авиационных ГТД по результатам измерения параметров час-

Таблица 2. Результаты анализа пробы смыва с маслофильтра дефектного двигателя ПС-90А

Элемент	Количество частиц изнашивания	Количество «сложных» частиц изнашивания	$R_{\text{общ}} \cdot 10^3$	Количество «простых» частиц изнашивания	$R_{\text{прост}} \cdot 10^3$	Средний размер частиц, мкм	$V_{\text{элемент}}$
Al	49	28	2,59	21	1,11	17,41	1,33
Cr	5918	2331	312,33	3587	189,31	12,34	0,65
Ni	1212	1008	63,96	204	10,77	5,61	4,94
Mg	693	204	36,57	489	25,81	8,37	0,42
Fe	8871	2809	468,18	6062	319,93	7,39	0,46
Cu	1721	321	90,83	1400	73,89	4,52	0,23
Ag	484	87	25,54	397	20,95	5,04	0,22
Σ	18 948	6788	—	12 160	—	—	—

тиц изнашивания сцинтилляционным методом [12, 34, 36].

Было обнаружено, что в смывах исправных двигателей в достаточно большом количестве присутствуют «простые» (одноэлементные) частицы. С возникновением дефекта, напротив, растет число «сложных» частиц, состоящих из двух и более элементов [12, 37]. Поэтому отношение количества «сложных» частиц изнашивания к числу «простых» частиц ($V_{\text{общ}}$) используют в качестве одного из основных диагностических признаков (в случае определенного элемента — $V_{\text{элемент}}$).

Поясним смысл этих параметров. Отношение количества «сложных» частиц износа к числу «простых» может служить индикатором общего технического состояния двигателя, поскольку было замечено, что чем это отношение меньше, тем лучше состояние трущихся поверхностей деталей ГТД, и наоборот, рост $V_{\text{общ}}$ свидетельствует о повышенном износе тех или иных агрегатов.

Зная $V_{\text{элемент}}$, можно точнее определить как тип элемента, ответственного за повышение $V_{\text{общ}}$, так в конечном счете и изношенный узел.

При принятии диагностического решения также учитывают: $R_{\text{общ}}$, $R_{\text{прост}}$ и $R_{\text{сл}}$ — доли частиц изнашивания определенного элемента, «простых» частиц изнашивания определенного элемента и «сложных» частиц изнашивания определенного состава (например Cu – Ag, Fe – Cr – Ni и др.) в общем количестве частиц изнашивания соответственно; R_G — количество различных составов «сложных» частиц (рост числа составов «сложных» частиц говорит об ухудшении состояния двигателя).

В табл. 2, 3 приведены результаты анализа на сцинтилляционном спектрометре пробы смыва с маслофильтра двигателя ПС-90А перед выводом его из эксплуатации (количество частиц указано в расчете на 1 см^3 , $V_{\text{общ}} = 0,56$, $R_G = 59$).

Полученные данные сравнивают с соответствующими параметрами статистической моде-

Таблица 3. Результаты исследования «сложных» частиц изнашивания

Состав	Количество «сложных» частиц данного состава	$R_{\text{сл}} \cdot 10^3$
Cr – Fe	1629	85,97
Ni – Fe	444	23,43
Cr – Ni – Fe	412	21,74
Fe – Cu	113	5,96
Cr – Ni	70	3,69
Mg – Fe	61	3,22
Cr – Cu	59	3,11
Cr – Mg	46	2,43
Mg – Cu	34	1,79
Fe – Ag	31	1,64
Cr – Fe – Cu	28	1,48
Cr – Ag	22	1,16
...
Ni – Mg – Fe	1	0,59

ли эталонного двигателя (например, эталонная статистическая модель исправного двигателя Д-30КП сформирована по результатам 450 анализов с 200 двигателей). Различие между эталонным и исследуемым двигателями сопоставляют с вероятными изменениями технического состояния.

Превышение $R_{\text{сл}}$ по «сложным» частицам Fe – Cr, Ni – Fe и Fe – Cr – Ni (см. табл. 3) относительно эталонного двигателя составило от 2,5 до 4 раз, что свидетельствует о повышенном износе хромированного покрытия вала центрального привода коробки приводов (заводская разборка двигателя это подтвердила). Было также установлено, что увеличение доли «сложных» частиц типа Cu – Ag характеризует износ посеребренных бронзовых сепараторов подшипников, Fe – Cu — бронзовых сепараторов без покрытия, Fe – Cr – Ni – V — роликоподшипника ТВД [39].

Таким образом, в случаях, когда дефект в узлах трения ГТД, омываемых смазочным маслом, развивается непрерывно и медленно, а функция распределения частиц по размерам с развитием дефекта не меняется, независимо от типа используемого оборудования (атомно-эмиссионный спектрометр, рентгенофлуоресцентный анализатор) несоответствие физико-химических параметров СО анализируемой пробе влияет на абсолютную величину измеряемого параметра. Дефект же будет обнаружен по увеличению значения параметра (с ростом наработки двигателя), а в качестве диагностических параметров одинаково успешно могут использоваться содержание и количество частиц изнашивания.

Опыт диагностики авиационных ГТД с применением рентгенофлуоресцентных анализаторов (типа БАРС) и атомно-эмиссионных спектрометров (МФС 3-7) показывает, что для двигателей Д-30КП/КУ/ КУ-154 (частота отбора пробы масла — 50 ч, толщина фильтрации — 70 мкм) достоверность результатов диагностики не превышает 7 %. Дефекты, выявляемые по увеличению содержания металлической примеси в пробах, чаще всего присутствуют в узлах коробки приводов и центрального привода. В результате заводских исследований двигателей установлено, что развитие дефекта происходит по схеме истирания подшипников с выделением мелкодисперсной фракции металлической примеси.

Повреждения узлов и деталей трансмиссионной части данного типа ГТД фиксировали по наличию стружки на МДС и фильтрах-сигнализаторах.

В случае ГТД типа ПС-90А (толщина маслофильтра — менее 40 мкм, частота отбора проб масла — 150 ч) дефекты узлов маслосистемы спектральным и феррографическим методами анализа проб масла выявлять не удается. Атомно-эмиссионный метод с вращающимся электродом также недостаточно точен.

Достоверность результатов диагностики узлов маслосистемы ГТД определяется, как минимум, тремя факторами: 1) видом функции распределения частиц по размерам (когда наблюдается (или отсутствует) пропорциональная связь между аналитическим сигналом и массовой долей металла в пробе масла); 2) конструктивными особенностями маслосистемы, вследствие которых информация об изношенных процессах в двигателе, получаемая исследованием частиц в пробе масла, слитой с коробки приводов либо маслобака, недостаточна для принятия верного диагностического решения; 3) прерывистостью процесса изнашивания; имеются виды изнашивания (например, выкрашивание), когда частицы в сис-

тему смазки могут поступать импульсно (отдельными порциями).

Использование в двигателях объемных фильтров (типа QA-07930) с ресурсом работы 600 ч поставило перед диагностами дополнительные проблемы. Данный фильтроэлемент одно-разовый, фильтрация происходит по глубине фильтрующего материала, что существенно затрудняет извлечение задержанных частиц.

Комплексным использованием результатов рентгенофлуоресцентных измерений массовой доли примесей и данных о количестве и размере частиц, получаемых с помощью счетчика Metal-Skan, можно достичь высокой достоверности диагностирования в случаях, когда развитие дефекта происходит с увеличением размера частиц (частицы более 100 мкм). Однако если размер частиц менее 100 мкм, то велика вероятность пропуска дефекта. Кроме того, на точность диагностики может налагаться «эксплуатационный фактор», влияющий на определение абсолютной величины массовой доли в пробе смыва с маслофильтра.

Диагностирование по результатам сцинтилляционных исследований не требует измерения абсолютных параметров частиц изнашивания, что значительно снижает требование к СО и влияние «эксплуатационного фактора» (периодичности отбора пробы, неполноты извлечения частиц с фильтроэлемента, степени разведения пробы смыва и др.). Диагностическое решение в этом случае принимают на основе анализа относительных параметров.

Достоверность диагностики при применении сцинтилляционного метода анализа по результатам анализа проб смывов с маслофильтра (фильтроэлемента, диагностической ленты) составляет около 95 %. Как правило, дефектный узел выявляется по элементному составу изношенных частиц. При этом одинаково успешно диагностируется техническое состояние как узлов трения центрального привода и коробки приводов, так и трансмиссионной части двигателя.

Подводя общий итог возможностям спектральных методов в трибодиагностике ГТД, отметим, что используемые аппаратура и технологии диагностирования узлов маслосистемы двигателя по результатам исследования пробы смыва позволили заметно повысить достоверность диагностики. Вместе с тем они имеют ограничения, связанные с периодичностью отбора пробы на анализ и диапазоном регистрируемых частиц износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ влияния надежности на безопасность полетов по типу ВС. — М.: Госцентр безопасности полетов, 2009. — 48 с.

2. Аттестат на методику приготовления и метрологической аттестации стандартных образцов предприятий (СОП) для градуировки спектрометра МОА, выполненной методом разбавления стандарта S 21 Conostan с концентрацией элементов 100 ppm чистым авиационным маслом. — М.: ГосНИИ ГА, 1994. — 11 с.
3. Аттестат методики измерения концентрации продуктов изнашивания на установках типа МФС при диагностике авиационных двигателей. — М.: ГосНИИ ГА, 1993. — 20 с.
4. Оценка технического состояния двигателя по содержанию металлических примесей в масле / Бюллетень № 384-БД-Г. — М.: ГосНИИ ГА, 1986. — 11 с.
5. Методические указания по изготовлению и метрологической аттестации стандартных образцов концентрации продуктов изнашивания для градуировки установок типа МФС при диагностике авиационных двигателей (на основе окислов). — М.: ГосНИИ ГА, 1993. — 16 с.
6. Методические указания по изготовлению и метрологической аттестации стандартных образцов продуктов изнашивания для градуировки анализаторов БАРС-3 при диагностике авиационных двигателей. — М.: ГосНИИ ГА, 1993. — 17 с.
7. Надежность, диагностика, контроль авиационных двигателей / Под ред. Шепеля В. Г. — Рыбинск: РГАТА, 2001. — 351 с.
8. Ямпольский В. И., Белоконов Н. И., Пилипоян Б. Н. Контроль и диагностирование гражданской авиационной техники. — М.: Транспорт, 1999. — 181 с.
9. Пайкин А. Г., Сиротин Н. Н., Новиков А. С. Контроль и диагностика технического состояния ГТД. — М.: Наука, 2007. — 472 с.
10. Степанов В. А. Диагностика технического состояния узлов трения трансмиссии ГТД по параметрам продуктов износа в масле. — Рыбинск: РГАТА, 2002. — 232 с.
11. Алхимов А. Б., Дроков В. Г., Казмиров А. Д. и др. Передаточная функция СВЧ плазмотрона, как источник сцинтилляционных сигналов / Аналитическая химия. 1996. Т. 51. № 9. С. 939 – 944.
12. Иноземцев А. А., Дроков В. Г., Дроков В. В. и др. Состояние, перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 4. Диагностические параметры и точки отбора пробы масла при оценке технического состояния авиационных ГТД по результатам спектральных измерений / Контроль. Диагностика. 2012. № 9(159). С. 20 – 28.
13. Jurko R., Lukas M., Anderson D. New Rotrode Filter Spectroscopy Method / Practicing Oil Analysis. 2006. № 9. On-line: <http://www.machinerylubrication.com/Read/918/rotrode-filter-spectroscopy>
14. Иноземцев А. А., Дроков В. Г., Дроков В. В. и др. Состояние и перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. Влияние технологий спектральных измерений массовой доли элементов в частицах изнашивания на результаты диагностирования узлов трения авиационных газотурбинных двигателей / Контроль. Диагностика. 2011. № 2(152). С. 32 – 39.
15. Day L. The secret's in the filter / Tribology & Lubrication Technology. 2008. P. 33 – 37.
16. Спектральный анализ чистых веществ / Под ред. Зильберштейна Х. И. — СПб.: Химия, 1994. — 336 с.
17. Барсуков В. И. Плазменно-эмиссионные и атомно-абсорбционные методы анализа и инструментальные способы повышения их чувствительности. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 172 с.
18. Кюрегян С. К. Атомный спектральный анализ нефтепродуктов. — М.: Химия, 1985. — 203 с.
19. Дроков В. Г. Повышение достоверности результатов диагностирования газотурбинных двигателей сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Иркутск, 2009. — 42 с.
20. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. Степаненко В. П. — М.: Транспорт, 1985. — 101 с.
21. Анализ съёмов двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 за период 2000 – 2004 гг. по неисправностям узлов, омываемых смазочным маслом / Техническая справка № 44-596168. — Рыбинск: НПО «Сатурн», 2005. — 27 с.
22. Alves F., Candeias A. TAPS Approach on Engine Failure Prediction / Mobil Aviation Monitoring Symposium. Washington. 1997.
23. Аттестат методики измерения концентрации продуктов изнашивания на анализаторах БАРС-3 при диагностике авиационных двигателей. — М.: ГосНИИ ГА, 1993. — 11 с.
24. Бабаев С. Н., Дроков В. Г., Морозов В. Н. и др. Диагностирование авиационных ГТД по накоплению продуктов изнашивания в смазочных маслах / 3-я Международная конференция «Энергодиагностика»: сб. статей. Т. 3. — М.: Трибология, 2001. С. 38 – 58.
25. Юдин А. А., Степанов В. А. Рекомендации по нормированию критериев оценки технического состояния узлов трансмиссии ГТД по результатам спектрального анализа масла / Конверсия в машиностроении. 2002. № 2. С. 35 – 41.
26. Дасковский М. И. Обобщение опыта трибодиагностики авиационных ГТД и разработка мер по повышению ее эффективности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2012. — 21 с.
27. Делли Р. Д. Обзор феррографии и ее применения при техническом обслуживании / 1-я Международная конференция «Энергодиагностика»: сб. статей. Т. 3. — М.: Трибология, 1995. С. 120 – 152.
28. Степанов В. А. Особенности диагностирования усталостного выкрашивания поверхностей трения подшипников качения и зубчатых колес передач газотурбинных двигателей / Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 9.
29. Акт-отчет № 207/037-502/98 по техническому состоянию подшипников качения после длительных испытаний двигателя Д-30КУ-154 № 485-459 до общей наработки 18000 часов и для оценки сцинтилляционного метода диагностики двигателя. — Рыбинск, 1998. — 19 с.
30. Toms A., Barret M. Using Filter Analysis To Identify Component Wear In Industrial Applications. 2009. On-line: http://www.testoil.com/downloads/Pdm_FDA_Paper.pdf.
31. Двигатель ПС-90А. Анализ эффективности методов диагностирования подшипников в эксплуатации / Техническая справка № 45412. — Пермь, 2007. — 17 с.
32. Humphrey G., Rojas I., Churehill D., Cross D. Prototype Instruments Built for PRAM / JOAP International Condition Monitoring. Pensacola. 2002. On-line: <http://studylib.net/doc/8861620/the-secret-s---gastops-inc>.
33. Harrop N., Montagu D. Early detection of transmission failures through oil system debris assessment / Roll-Royce. VCOM 4838. December 2001. Issue 1.
34. Пат. 2251674 РФ, МПК 7 G 01 M 15/00, G 01 N 3/56. Способ оценки технического состояния подшипников трансмиссии авиационных двигателей / Гайдай М. С. [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн», ООО «Диагностические технологии». — № 2002132524; заявл. 03.12.2002; опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13.
35. Франкштейн Л. И. Опыт разработки и внедрения перспективных схем и устройств в масляную систему авиадвигателя / Конверсия в машиностроении. 2003. № 3. С. 72 – 91.
36. Humphrey G. R. Filter Debris Analysis by Energy Dispersive X-RAY Fluorescence Applied to J52P408 Engines / Denver X-Ray Conference. August 2007. On-line: http://www.icdd.com/resources/axa/vol51/v51_37.pdf.
37. Иноземцев А. А., Дроков В. Г., Дроков В. В. и др. Состояние, перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 3. Сцинтилляционный атомно-эмиссионный способ измерения параметров металлических частиц в пробах авиационных масел / Контроль. Диагностика. 2011. № 6(156). С. 14 – 27.
38. Иноземцев А. А., Дроков В. В., Дроков В. Г. и др. Элементный состав частиц изнашивания, накапливаемых в системе смазки авиационных ГТД / Контроль. Диагностика. 2011. № 3(153). С. 52 – 56.
39. Двигатели Д-30КП/КУ/КУ-154, имевшие неисправности узлов и агрегатов, омываемых маслом при контроле сцинтилляционным методом за период 2000 – 2007 гг. / Техническая справка № 44-517141. — Рыбинск: НПО «Сатурн», 2008. — 18 с.

REFERENCES

1. Analysis of reliability influence on aircraft flight safety. — Moscow: Gostsentr bezopasnosti poletov, 2009. — 48 p. [in Russian].
2. Certificate for technique of preparation and metrological certification of graduation enterprise standards for MOA spectrometer via dilution of S 21 Conostan standard at element concentration 100 ppm with clean aviation oil. — Moscow: GosNII GA, 1994. — 11 p. [in Russian].
3. Certificate of technique for measuring the concentration of wear products using MFS analyzer for the diagnostics of aircraft engines. — Moscow: GosNII GA, 1993. — 20 p. [in Russian].
4. Evaluation of technical condition of the engine by the concentration of metallic impurities in the oil / Bull. N 384-BD-G. — Moscow: GosNII GA, 1986. — 11 p. [in Russian].
5. Guidelines for the production and metrological certification of wear products concentration standards for calibration of MFS type analyzers for the diagnostics of aircraft engines (based on oxides). — Moscow: GosNII GA, 1993. — 16 p. [in Russian].
6. Guidelines for the production and metrological certification of wear products concentration standards for calibration of BARS-3 analyzers for the diagnostics of aircraft engines. — Moscow: GosNII GA, 1993. — 17 p. [in Russian].
7. **Shepel' V. G.** (ed.). Reliability, diagnostics and monitoring of the aircraft engines. — Rybinsk: RGATA, 2001. — 351 p. [in Russian].
8. **Yampol'skii V. I., Belokon' N. I., Pilipoyan B. N.** Monitoring and diagnostics of the civil aircrafts. — Moscow: Transport, 1999. — 181 p. [in Russian].
9. **Paikin A. G., Sirotin N. N., Novikov A. S.** Monitoring and diagnostics of the AGTE (aircraft gas turbine engines). — Moscow: Nauka, 2007. — 472 p. [in Russian].
10. **Stepanov V. A.** AGTE (aircraft gas turbine engines) transmission diagnostics and fault location by evaluation of oil wear products. — Rybinsk: RGATA, 2002. — 232 p. [in Russian].
11. **Alkhimov A. B., Drovok V. G., Kazmirov A. D., et al.** Microwave generator transfer function as source of scintillation signals / Analit. Khimiya. 1996. Vol. 51. N 9. P. 939–944 [in Russian].
12. **Inozemtsev A. A., Drovok V. G., Drovok V. V., et al.** Condition and prospects of the spectral methods for the diagnostics of aircraft gas turbine engines. Part 4. Diagnostic parameters and oil sampling points in evaluating of the technical condition of gas turbine engines via spectral measurements / Kontrol'. Diagn. 2012. N 9(159). P. 20–28 [in Russian].
13. **Jurko R., Lukas M., Anderson D.** New Rotrode Filter Spectroscopy Method / Practicing Oil Analysis. 2006. N 9. On-line: <http://www.machinerylubrication.com/Read/918/rotrode-filter-spectroscopy>
14. **Inozemtsev A. A., Drovok V. G., Drovok V. V., et al.** Condition and prospects of the spectral methods for the diagnostics of aircraft gas turbine engines. Part 1. Influence of the wear particles elements concentration spectral measurement technique on the results of diagnostics of aircraft gas turbine engines / Kontrol'. Diagn. 2011. N 2(152). P. 32–39 [in Russian].
15. **Day L.** The secret's in the filter / Tribology & Lubrication Technology. 2008. P. 33–37.
16. **Zil'bershtein Kh. I.** (ed.). Spectral analysis of pure substances. — St. Petersburg: Khimiya, 1994. — 336 p. [in Russian].
17. **Barsukov V. I.** Atomic-absorption and plasma-emission analysis methods and instrumental techniques for increasing their sensitivity. — Moscow: Mashinostroenie-1, 2004. — 172 p. [in Russian].
18. **Kyuregyan S. K.** Atomic spectral analysis of petroleum products. — Moscow: Khimiya, 1985. — 203 p. [in Russian].
19. **Drovok V. G.** Increasing the reliability of turbine engines diagnostics using scintillation method to reduce the risk of emergency situations in the operation of aircraft. Author's abstract of doctoral thesis. — Irkutsk, 2009. — 42 p. [in Russian].
20. **Stepanenko V. P.** (ed.). Practical use of diagnostics of aircraft gas turbine engines. — Moscow: Transport, 1985. — 101 p. [in Russian].
21. D-30KP/KU/KU-154 engine dismission from 2000 to 2004 due to faults of oil lubricated components / Technical Reference N 44-596168. — Rybinsk: NPO «Saturn», 2005. — 27 p. [in Russian].
22. **Alves F., Candeias A.** TAPS Approach on Engine Failure Prediction / Mobil Aviation Monitoring Symposium. Washington. 1997.
23. Certificate of technique for measuring the concentration of wear products using BARS-3 analyzer for the diagnostics of aircraft engines. — Moscow: GosNII GA, 1993. — 11 p. [in Russian].
24. **Babaev S. N., Drovok V. G., Morozov V. N., et al.** Aircraft GTE diagnostics on the basis of accumulation of wear products in oil lubricant / 3rd Int. Conf. «Energy Diagnostics»: a collection of articles. Vol. 3. — Moscow: Tribologiya, 2001. P. 38–58 [in Russian].
25. **Yudin A. A., Stepanov V. A.** Recommendations for standardization of criteria for assessment of aircraft engine transmission nodes technical condition by the results of oil spectral analysis / Konvers. Mashinostr. 2002. N 2. P. 35–41 [in Russian].
26. **Daskovskii M. I.** Summarizing aircraft GTE diagnostics experience and development of measures to improve its efficiency. Author's abstract of candidate's thesis. — Moscow, 2012. — 21 p. [in Russian].
27. **Delli R. D.** Ferrography and its use in the maintenance overview / 1st Int. Conf. «Energy Diagnostics»: a collection of articles. Vol. 3. — Moscow: Tribologiya, 1995. P. 120–152 [in Russian].
28. **Stepanov V. A.** Diagnostic features of fatigue spalling of the friction surfaces of rolling bearings and gears of gas turbine engines / Trenie Smazka Mash. Mekhanizm. 2006. N 9.
29. Report N 207/037-502/98 on the technical condition of rolling bearings after prolonged tests of D-30KU-154 N 485-459 engine under 18,000 flight hours mileage and scintillation engine diagnostics method. — Rybinsk, 1998. — 19 p. [in Russian].
30. **Toms A., Barret M.** Using Filter Analysis To Identify Component Wear In Industrial Applications. 2009. On-line: http://www.testoil.com/downloads/Pdm_FDA_Paper.pdf.
31. PS-90A engines. Bearing on-the-fly diagnosis methods efficiency analysis / Technical Reference N 45412. — Perm', 2007. — 17 p. [in Russian].
32. **Humphrey G., Rojas I., Churehill D., Cross D.** Prototype Instruments Built for PRAM / JOAP International Condition Monitoring. Pensacola. 2002. On-line: <http://studylib.net/doc/8861620/the-secret-s---gastops-inc>.
33. **Harrop N., Montagu D.** Early detection of transmission failures through oil system debris assessment / Roll-Royce. VCOM 4838. December 2001. Issue 1.
34. RF Pat. N 2251674, MPK 7 G 01 M 15/00, G 01 N 3/56. Technique for aircraft engines transmission bearings technical condition evaluation / Gaidai M. S. et al.; applicant and owner OAO «NPO «Saturn», OOO «Diagnosticskie tekhnologii». — N 2002132524; appl. 03.12.2002; publ. 10.05.2005. Byull. Otkryt. Izobret. N 13 [in Russian].
35. **Frankshtein L. I.** Case of development and implementation of advanced circuits and devices in the oil system of aircraft engine / Konvers. Mashinostr. 2003. N 3. P. 72–91 [in Russian].
36. **Humphrey G. R.** Filter Debris Analysis by Energy Dispersive X-RAY Fluorescence Applied to J52P408 Engines / Denver X-Ray Conference. August 2007. In-line: http://www.icdd.com/resources/axa/vol51/v51_37.pdf.
37. **Inozemtsev A. A., Drovok V. G., Drovok V. V., et al.** Condition and prospects of the spectral methods for the diagnostics of aircraft gas turbine engines. Part 3. Scintillation atomic emission method of measuring parameters of metal particles in the aircraft oil samples / Kontrol'. Diagn. 2011. N 6(156). P. 14–27 [in Russian].
38. **Inozemtsev A. A., Drovok V. V., Drovok V. G., et al.** The elemental composition of the wear particles accumulated in the lubrication system of aircraft gas turbine engines / Kontrol'. Diagn. 2011. N 3(153). P. 52–56 [in Russian].
39. D-30KP/KU/KU-154 engines that have faults of oil lubricated components 2000–2007 under the monitoring by scintillation method / Technical Reference N 44-517141. — Rybinsk: NPO «Saturn», 2008. — 18 p. [in Russian].