

УДК 621.431.75

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ, ОСНАЩЁННЫХ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОМ С ДИАГНОСТИЧЕСКИМ СЛОЕМ

© 2014 В.В. Дроков¹, В.Г. Дроков¹, В.В. Мурыщенко¹, Ф.И. Мухутдинов²,
В.Ф. Халиуллин²

¹Научно-исследовательский институт прикладной физики
Иркутского государственного университета
²ОАО «Авиадвигатель» г. Пермь

Показана возможность использования диагностического слоя Dirt Alert для диагностирования двигателей ПС-90А, оснащённых фильтроэлементами QA-07930-01 фирмы PALL. Разделение Dirt Alert по высоте на несколько частей позволяет получить пробу смыва и производить диагностику ПС-90А без разборки и замены основного фильтроэлемента до выработки его ресурса. Разработаны устройство и ультразвуковая методика извлечения частиц износа с диагностического слоя. Установлено, что представительность пробы смыва обеспечивается при однократном прохождении диагностической ленты в лентопротяжном устройстве в течение 20 минут. Рассмотрена возможность использования для принятия диагностического решения по двигателям ПС-90А, оснащённых фильтроэлементом QA-07930-01, ранее разработанной по пробам смыва статистической модели исправного двигателя ПС-90А с фильтроэлементом без диагностического слоя. В данной модели в качестве диагностических параметров использованы рейтинги частиц износа. Показано, что параметры частиц износа в пробе смыва, выделенных с диагностического слоя фильтроэлемента QA-07930-01, не отличаются от параметров частиц в пробе смыва с фильтроэлемента QA-07930. Поэтому оценка технического состояния ПС-90А, оснащённых фильтроэлементом QA-07930-01, возможна с использованием статистической модели исправного двигателя ПС-90А, построенной по результатам сцинтилляционных измерений по пробам смыва с фильтроэлемента QA-07930. Сделан вывод, что перспективным направлением для получения экспрессных и достоверных результатов оценки технического состояния системы смазки ПС-90А является оснащение данного типа двигателей фильтроэлементом типа QA-07930-01.

Фильтроэлемент, диагностическая лента, частицы изнашивания, сцинтилляционный спектрометр, статистическая модель, газотурбинный авиационный двигатель, диагностический признак, параметры частиц изнашивания, проба смыва с маслофильтра.

Современные авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) предъявляют повышенные требования к очистке смазывающих масел. Поэтому на смену сетчатым многоцветным маслофильтрам с ячейками размером 40-100 мкм пришли одноразовые фильтроэлементы, выполненные из нетканого материала, с толщиной фильтрации 10 - 15 мкм с ресурсом 600 часов (одноразовые маслофильтры типа PALL). В [1] показано, что достоверность результатов оценки технического состояния системы смазки Д-30КП/ КУ/ КУ-154 значительно повышается при учёте параметров частиц изнашивания при анализе пробы смыва с маслофильтра. Были найдены диагностические признаки, связывающие техническое состояние двигателя с параметрами частиц износа.

Применение одноразовых фильтроэлементов с ресурсом 600 часов поставило следующую проблему. В двигателях Д-30КП/ КУ/КУ-154 используется многоцветный сетчатый фильтр МФС-30, который в любое время можно разобрать, промыть, получить пробу смыва и поставить на место. В случае установки одноразового фильтроэлемента PALL QA-07930 и регламенте обслуживания двигателя 200 часов после получения пробы смыва необходимо устанавливать новый фильтроэлемент, что ведёт к дополнительным издержкам. С другой стороны, время развития большей части дефектов (от их возникновения до стадии предотказного состояния двигателя) составляет 200...250 ч. В [2] продемонстрирована технология получения смыва с фильтроэлемента QA-07930. Для этого отрезается

нижняя часть фильтроэлемента, вынимается фильтрующая лента, с части ленты производится смыв и выделенные частицы анализируются.

В последнее время в эксплуатации начали использоваться фильтроэлементы QA-07930-01 с диагностическим слоем Dirt Alert. В работе ставилась задача разработки получения смыва с ленты Dirt Alert и возможности оценки технического состояния системы смазки ГТД по результатам измерения параметров частиц в пробе данного смыва сцинтилляционным методом.

Фильтроэлемент фирмы PALL комплектуется диагностической лентой, состоящей из двух частей (нижней и верхней). За счёт этого пробы смывов можно получать каждые 200 часов. Сначала снимается верхняя часть ленты, ещё через 200 часов – нижняя, и через 600 часов с начала эксплуатации снимается и производится смыв с фильтроэлемента.

Теоретически можно разделить диагностическую ленту на большее количество частей и получать смыв с авиадвигателя через любые требуемые промежутки времени. При этом при использовании части ленты фильтроэлемент может снова устанавливаться в двигатель и эксплуатироваться до выработки ресурса.

Для получения смыва с диагностической ленты фильтроэлемента QA-07930-01 фирмы PALL было разработано специальное устройство, которое помещается в ультразвуковую ванну, предварительно на 2/3 заполненную нефрасом. За счёт кавитационных явлений частицы износа переходят с ленты фильтроэлемента в жидкость. Полученные смывы отстаиваются, нефрас сливается до получения мокрого осадка, который затем заливается «чистым» маслом МС-8П. После этого проба поступает на анализ на сцинтилляционный спектрометр.

Для оценки технического состояния авиадвигателей ПС-90А использовалась статистическая модель исправного двигателя, разработанная ранее по результатам анализа проб масла и смывов с масло-

фильтра с исправных двигателей, оснащённых фильтроэлементом QA-07930 (табл. 1).

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

- среднее – среднее значение параметра X ;
- σ – стандартное отклонение (дисперсия).

При оценке технического состояния системы смазки двигателя по результатам анализа пробы масла отсутствует проблема в выборе диагностических параметров. В качестве таких параметров могут быть использованы абсолютные значения содержания растворённого металла, содержания металлов в частицах износа, количество частиц и т.д.

Использование этих же параметров для пробы смыва с маслофильтра в практике невозможно, поскольку они зависят от большого числа факторов, которые невозможно учесть: времени наработки фильтра, типа двигателя, типа масла, полноты извлечения частиц с фильтра, условий эксплуатации двигателя и т.д.

При сцинтилляционных измерениях [3] было обращено внимание на то, что в исправном двигателе в пробе масла и пробе смыва в довольно больших количествах присутствуют одноэлементные, «простые» частицы. С возникновением и развитием повреждения количество «простых» частиц уменьшалось с одновременным увеличением частиц, состоящих из двух и более элементов - «сложных» частиц.

В качестве одного из основных диагностических признаков использовалось $V_{\text{общ}}$ – отношение общего количества «сложных» частиц изнашивания (частиц, состоящих из двух и более элементов) к общему количеству «простых» частиц изнашивания (частиц, состоящих из одного элемента).

Кроме того, имеется параметр $V_{\text{элемент}}$ – отношение количества «сложных» частиц изнашивания к количеству «простых» частиц изнашивания для определённого элемента.

Таблица 1 - Статистическая модель исправного двигателя ПС-90А, оснащенного масляным фильтром PALL без диагностического слоя

| Параметр | Состав | Среднее | $X + 2\sigma$ | $X + 3\sigma$ | |
|---------------------------------|---------------------------------|---------|---------------|---------------|-------|
| Рейтинг частиц износа R_0 | Mg- | 250.14 | 528.35 | 741.50 | |
| | Cu- | 311.36 | 655.78 | 919.27 | |
| | Ni- | 40.40 | 79.07 | 107.54 | |
| | Fe- | 154.56 | 290.54 | 388.58 | |
| | Ag- | 126.50 | 306.35 | 454.22 | |
| | Cr- | 51.91 | 106.88 | 148.45 | |
| | Al- | 64.14 | 184.80 | 293.30 | |
| | V- | 1.05 | 5.17 | 10.12 | |
| Рейтинг простых частиц $R_{пр}$ | Ni- | 14.34 | 33.09 | 48.12 | |
| | Fe- | 90.26 | 209.04 | 304.48 | |
| | Ag- | 94.30 | 278.37 | 445.98 | |
| | Cr- | 11.36 | 33.23 | 53.05 | |
| | Al- | 41.50 | 143.99 | 245.55 | |
| | Cu- | 273.35 | 622.84 | 901.29 | |
| | Mg- | 187.87 | 460.69 | 686.43 | |
| | V- | 0.19 | 0.63 | 1.04 | |
| | Рейтинг сложных частиц $R_{сл}$ | Mg-Fe- | 12.11 | 31.33 | 47.69 |
| | | Cr-Fe- | 10.22 | 27.59 | 42.69 |
| Cr-Mg- | | 7.85 | 23.67 | 38.24 | |
| Mg-Cu- | | 7.62 | 19.36 | 29.26 | |
| Cr-Ni-Fe- | | 6.70 | 22.32 | 37.49 | |
| Al-Mg- | | 6.46 | 18.40 | 29.06 | |
| Mg-Ag- | | 6.36 | 20.87 | 34.83 | |
| Cu-Ag- | | 6.17 | 12.46 | 17.17 | |
| Ni-Fe- | | 5.09 | 18.29 | 31.61 | |
| Al-Fe- | | 3.70 | 10.56 | 16.69 | |
| Fe-Cu- | | 3.69 | 9.41 | 14.23 | |
| Fe-Ag- | | 3.50 | 9.21 | 14.11 | |
| Mg-Cu-Ag- | | 3.47 | 11.72 | 19.80 | |
| Al-Cu- | | 2.39 | 11.29 | 21.77 | |
| Параметр износа $V_{эл}$ | Ni- | 2.19 | 5.68 | 8.66 | |
| | Fe- | 0.83 | 1.67 | 2.30 | |
| | Cr- | 4.69 | 11.77 | 17.70 | |
| | Al- | 0.75 | 1.77 | 2.60 | |
| | V- | 8.90 | 34.32 | 60.99 | |
| Параметр износа $V_{общ}$ | | 0.43 | 0.82 | 1.02 | |
| Количество составов G | | 82.64 | 121.83 | 141.42 | |

Смысл выбранных параметров следующий. Отношение количества «сложных» частиц к количеству «простых» частиц износа $V_{общ}$ является индикатором общего технического состояния двигателя, поскольку ранее была замечена закономерность: чем меньше данный параметр, тем лучше состояние трущихся поверхностей деталей двигателя, и, наоборот, увеличение данного параметра свиде-

тельствовало о повышенном износе деталей двигателя.

Используя дополнительный параметр $V_{эле}$, можно более детально определить тип элемента, ответственного за повышение $V_{общ}$, и тем самым обратить внимание на «сложные» частицы, содержащие данный элемент. Это, в конечном счёте, позволяет более точно определять изношенный агрегат двигателя.

Были введены следующие параметры:

$R_{\text{общ}}$ – вклад общего количества частиц изнашивания, содержащих определённый элемент, в общее количество частиц изнашивания (рейтинг частиц изнашивания по элементам);

$R_{\text{прост}}$ – вклад количества «простых» частиц изнашивания определённого элемента в общее количество частиц изнашивания (рейтинг «простых» частиц изнашивания по элементам);

$R_{\text{сл}}$ – вклад количества «сложных» частиц изнашивания определённого состава в общее количество частиц изнашивания (рейтинг «сложных» частиц определённого состава, например Cu-Ag, Fe-Cr-Ni и т.д.);

R_G – количество различных составов «сложных» частиц.

Рейтинг частиц износа рассчитывался, как количество частиц определённого сорта, приходящихся на 1000 частиц износа. Тем самым устранялось влияние времени накопления частиц на фильтре, степени разбавления пробы и т.д.

Очевидно, что для создания технологии диагностирования с использованием слоя ленты Dirt Alert, необходимо для каждого слоя построить свою статистическую модель исправного двигателя. После этого необходимо провести сравнение по

параметрам частиц износа разработанных моделей с ранее полученной моделью для фильтра PALL без диагностического слоя. Очевидно, что в случае близости моделей (в идеале - полного совпадения) для оценки технического состояния узлов трения ПС-90А можно будет воспользоваться всего одной моделью. Это значительно упрощает принятие диагностического решения.

Для оценки возможности использования ранее разработанной статистической модели для диагностики ПС-90А, оснащённых фильтром PALL с диагностической лентой Dirt Alert, применялся следующий подход.

Поскольку смывы с Dirt Alert характеризовали исправные двигатели, то полученные для этих смывов параметры частиц износа сравнивались с соответствующими параметрами ранее разработанной статистической модели для фильтра PALL без диагностического слоя. Понятно, что ранее разработанную статистическую модель можно использовать для диагностики ПС-90А, оснащённых фильтром PALL с диагностическим слоем в случае, когда ни один из измеряемых параметров частиц для смыва с Dirt Alert не выходит за пределы $X + 2\sigma$ в модели для PALL без диагностического слоя (табл. 2).

Таблица 2 - Протокол сравнения с моделью сцинтилляционного анализа частиц износа

| Протокол № d16657 | | | | | | |
|--|----------------|--------|----------|--------|--------|--------|
| Сравнение с моделью сцинтилляционного анализа частиц износа | | | | | | |
| Двигатель: | пс90а №: 20012 | | | | | |
| Номер борта: | 64512 | | | | | |
| Точка отбора пробы: | диаг. лента | | | | | |
| Дата отбора пробы: | 17.07.2008 | | | | | |
| Дата анализа: | 12.03.2009 | | | | | |
| Количество проведенных параллельных... 5 | | | | | | |
| Отношение количества сложных частиц к количеству простых $V_{\text{общ}} = 0.22$ | | | | | | |
| Количество составов сложных частиц 98 | | | | | | |
| I. Параметры частиц износа | | | | | | |
| Элемент | N, см3 | R0 | Nпр, см3 | R пр. | D, мкм | V элем |
| Al | 510.00 | 70.70 | 323.00 | 44.78 | 47.26 | 0.58 |
| Cr | 117.40 | 16.27 | 29.80 | 4.13 | 0.00 | 2.94 |
| Ni | 211.80 | 29.36 | 115.40 | 16.00 | 2.59 | 0.84 |
| Mg | 903.60 | 125.26 | 632.80 | 87.72 | 10.40 | 0.43 |
| Fe | 718.20 | 99.56 | 440.00 | 61.00 | 13.67 | 0.63 |
| Cu | 4428.00 | 613.84 | 4106.60 | 569.29 | 6.14 | 0.08 |
| Ag | 324.00 | 44.92 | 243.20 | 33.71 | 0.00 | 0.33 |
| V | 0.60 | 0.08 | 0.20 | 0.03 | 0.00 | 2.00 |

| II. Состав и количество сложных частиц | | |
|--|------------|---------|
| Состав сложных частиц | Количество | Рейтинг |
| Mg-Cu- | 71.2 | 9,87 |
| Fe-Cu- | 64.6 | 8.96 |
| Al-Cu- | 61.6 | 8.54 |
| Mg-Fe- | 61.4 | 8.51 |
| Cu-Ag- | 35 | 4.85 |
| Al-Mg- | 34 | 4.71 |
| Ni-Fe- | 24 | 3.33 |
| Al-Fe- | 23.4 | 3.24 |
| Cr-Mg- | 19.8 | 2.74 |

При сравнении полученных результатов со статистической моделью видно, что данные анализа смывов с диагностических лент не превышают значений $X + 3\sigma$ для ранее разработанной статистической модели исправного двигателя ПС-90А для смыва с фильтроэлемента PALL без диагностической ленты. Поэтому на данном этапе работ для диагностики ПС-90А, оснащённых фильтром PALL с диагностическим слоем Dirt Alert, возможно использование ранее разработанной статистической модели.

Полученные в работе результаты можно сформулировать следующим образом:

- разработана методика получения смыва с ленты Dirt Alert фильтроэлемента

PALL, которым комплектуются авиадвигатели ПС-90А;

- разделение ленты Dirt Alert на несколько слоёв позволяет производить диагностику ПС-90А без замены основного маслофильтра и через необходимые промежутки времени;

- для сцинтилляционного анализа можно использовать первый смыв с ленты Dirt Alert (первые 20 мин озвучивания в УЗ ванне), так как он наиболее полно отражает состав частиц износа, осевших на ленте;

- для диагностики ПС-90А, оснащённого маслофильтром PALL с диагностическим слоем Dirt Alert, возможно использование ранее разработанной статистической модели для фильтра PALL без диагностического слоя.

Библиографический список

1. Гайдай М.С., Дроков В.Г., Казмиров А.Д., Овчинин Н.Н., Скудаев Ю.Д. Способ диагностики состояния двигателей. Патент РФ № 22239172; опублик. 27.10.2004; бюл. № 30.

2. Early detection of transmission failures through oil system debris assessment. Rolls – Royce plc. 2001.

3. Дроков В.Г. Сцинтилляционный метод диагностики, обеспечивающий повышение уровня безопасности эксплуатации газотурбинных двигателей. Автореф. дис. д-ра техн. наук. Иркутск, 2009. 42 с.

Информация об авторах

Дроков Виктор Григорьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института прикладной физики, Иркутский государственный университет. E-mail: dtech@api.isu.ru. Область научных интересов: разработка новых спектральных методов, разработка новых технологий

диагностирования двигателей, машин и механизмов.

Дроков Владислав Викторович, кандидат наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского института прикладной физики, Иркутский государственный университет. E-mail: dtech@api.isu.ru. Область научных интересов: разработка новых технологий ди-

агностирования двигателей, машин и механизмов.

Мурыщенко Владимир Валерьевич, инженер научно-исследовательского института прикладной физики, Иркутский государственный университет. E-mail: dtech@api.isu.ru. Область научных интересов: разработка спектральных методов измерения, проведение аттестационных исследований.

Мухутдинов Фарит Имбраевич, заместитель начальника отдела диагно-

стики, ОАО «Авиадвигатель», E-mail: muhutdinov@avid.ru. Область научных интересов: разработка и внедрение технологий диагностирования системы смазки авиационных ГТД.

Халиуллин Виталий Фердинандович, начальник КО – 403, ОАО «Авиадвигатель». E-mail: khalioullin@avid.ru. Область научных интересов: разработка и внедрение технологий диагностирования системы смазки авиационных ГТД.

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF DIAGNOSTICS OF TURBO-JET AVIATION ENGINES BY A FILTERING ELEMENT WITH A DIAGNOSTIC LAYER

© 2014 V.V. Drokov¹, V.G. Drokov¹, V.V. Murysenko¹, F.I. Mukhutdinov², V.F. Khaliullin²

¹Applied Physics Institute of Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

²Open Joint-Stock Company “Aviadvigatel”, Perm, Russian Federation

The possibility to use the Dirt Alert diagnostic layer to diagnose PS-90A engines equipped with QA-07930-01 filter elements by Pall Corporation is shown. Division of Dirt Alert diagnostic layer into parts according to their height allows to get wash samples and to make diagnostics of PS-90A engine without disassembly and replacement of main filter element before completion of its mission. Device and ultrasound methodology of wear debris particles extraction from diagnostic layer are developed. It is determined that wash sample presentability is provided by single passage of diagnostic layer in tape drive during 20 minutes. The possibility to use a statistical model of operational PS-90A engine equipped with the filter element without diagnostic layer that had been previously developed basing on wash sample analysis in order to make a diagnostic decision on PS-90A engines equipped with QA-07930-01 filter element is considered. In this model, wear debris particles ratings are used as diagnostic parameters. It is shown that parameters of wash sample wear debris particles extracted from diagnostic layer of QA-07930-01 filter element do not differ from QA-07930 filter element wash sample particles parameters. It means that PS-90A engine equipped with QA-07930-01 filter element technical state evaluation is possible with use of the statistical model of operational PS-90A engine equipped with the filter element without diagnostic layer developed basing on scintillation analysis of wash sample taken from QA-07930 filter element. The conclusion is made that perspective direction to get express and reliable results of technical state evaluation for PS-90A engine lubrication system is to equip engines of this type with QA-07930-01-type filter element.

Oil filter, diagnostic layer, wear particles, statistical model, turbo-jet aviation engines, diagnostic sign, parameters of wear particles, wash sample from oil filter.

References

1. Gajdaj M.S., Drovov V.G., Kazmirov A.D., Ovchinin N.N., Skudaeв Ju.D. Sposob diagnostiki sostoyaniya dvigateley [Method of diagnostics of availability of engines]. Patent RF, no. 22239172, 2004. (Publ. 27.10.2004, bull. No. 30.)
2. Early detection of transmission failures through oil system debris assessment. Rolls – Royce plc. 2001.
3. Drovov V.G. Stsintillyatsionnyy metod diagnostiki, obespechivayushchiy povyshenie urovnya bezopasnosti ekspluatatsii gazoturbinnnykh dvigateley.

Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk [Scintillation method of diagnostics, providing rise of the safety level in exploitation of turbo-jet en-

gines. Abstract of doctor dissertation in techniques]. Irkutsk, 2009. 42. p.

About the authors

Drokov Victor Grigorievich, Doctor of Science (Engineering), leading researcher of Applied Physics Institute of Irkutsk State University. E-mail: dtech@api.isu.ru. Area of Research: development of new spectral methods, development of new technologies for diagnostics of engines and mechanisms.

Drokov Vladislav Victorovich, Candidate of Science, senior researcher of Applied Physics Institute of Irkutsk State University. E-mail: dtech@api.isu.ru. Area of Research: development of new technologies for diagnostics of engines and mechanisms.

Muryshenko Vladimir Valerievich, engineer of Applied Physics Institute of Irkutsk State University. E-mail: dtech@api.isu.ru. Area of Research: development of

new technologies for diagnostics of engines and mechanisms, certification investigations.

Mukhutdinov Farit Ibraevich, deputy head of department of diagnostics, Open Joint-Stock Company “Aviadvigatel”, E-mail: muhutdinov@avid.ru. Area of Research: development and introduction of technologies of diagnostics for lubrication system of turbo-jet aviation engines.

Khaliullin Vitaly Ferdinandovich, head of KO – 403, Open Joint-Stock Company “Aviadvigatel”, E-mail: muhutdinov@avid.ru. Area of Research: development and introduction of technologies of diagnostics for lubrication system of turbo-jet aviation engines.