

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Д-30КП/КУ/КУ-154 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**© 2006 В.В. Бушманов<sup>1</sup>, В.В. Дроков<sup>2</sup>, В.Г. Дроков<sup>3</sup>, Ю.Д. Скудаев<sup>3</sup>, А.А. Элькес<sup>1</sup><sup>1</sup>ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск,<sup>2</sup>ООО «Диагностические технологии», г. Иркутск,<sup>3</sup>НИИ прикладной физики ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет»

По результатам диагностирования исправных двигателей накоплена достаточная статистика, которая позволила создать своего рода эталонный двигатель по параметрам частиц износа, измеренных сцинтилляционным способом, с учетом наработки и типа двигателя.

Для оценки технического состояния узлов трения, омываемых смазочным маслом авиационных двигателей, в России и за рубежом используются спектральные атомно-эмиссионный и рентгенофлуоресцентный способы анализа.

Отношение производителей авиадвигателей и авиакомпаний к спектральным способам неоднозначно. Например, Rolls-Royce не рекомендует использовать спектральные методы анализа для диагностирования своих двигателей. Pratt & Whitney оставляет применение данных методов на усмотрение авиакомпаний, а авиакомпания TAP-AIR PORTUGAL считает, что результатам спектральных измерений можно верить, но полностью полагаться нельзя. Российские производители авиадвигателей повсеместно рекомендуют авиакомпаниям к использованию спектральные способы. Так, весь парк самых массовых в России двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 диагностируется с помощью атомно-эмиссионных и рентгенофлуоресцентных спектрометров МФС-7 и БАРС.

Такая неоднозначная реакция эксплуатантов и производителей двигателей к спектральным способам вызвана тем, что нередко по результатам спектральных измерений двигатель отстранялся от эксплуатации, но дефект не обнаруживался при заводской разборке, т.е. двигатель был снят с эксплуатации необоснованно. Либо, результаты спектральных измерений указывали на исправность двигателя, но двигатель после такого обследования выключался в полете по срабатыванию табло «Стружка в масле».

По сведениям НПО «Сатурн» до 95 % двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 снимается досрочно с эксплуатации по срабатыванию

табло «Стружка в масле», либо после обнаружения стружки на контрольных элементах (магнитных пробках, фильтрах и т.д.) [1]. Только 5 % двигателей обоснованно отстраняется от эксплуатации по показаниям спектральных приборов. Отсюда видно, что диагностическая эффективность традиционных спектральных способов чрезвычайно низка и названные способы не могут быть использованы для выявления дефектов на ранней стадии развития.

Низкая эффективность спектральных способов обусловлена следующими основными причинами – существенным влиянием размеров частиц на результаты измерения массовой доли и недостаточной информативностью используемых способов о параметрах частиц износа.

К новому классу оборудования, позволяющему экспрессно получать необходимую информацию о частицах металлической примеси, обладающему необходимыми метрологическими характеристиками относится плазменный атомно-эмиссионный сцинтилляционный спектрометр [2].

При использовании аналитической навески в 1 мл атомно-эмиссионный сцинтилляционный спектрометр за время 10 минут выдает следующую информацию по 8 элементам (Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Mg, Ni, V):

- массовая доля элементов, находящихся в масле в виде частиц изнашивания  $C_4$  (г/т);
- массовая доля элементов, растворенных в масле  $C_p$  (г/т);
- суммарное, интегральное значение массовой доли данного элемента  $C = C_p + C_4$  (г/т);
- общее число частиц износа  $N$  (см<sup>-3</sup>);

- число «простых» частиц, состоящих только из одного элемента  $N_{пр}$  ( $см^{-3}$ );
- число «сложных» частиц, состоящих из нескольких элементов  $N_{сл}=(N-N_{пр})$  ( $см^{-3}$ );
- средний размер частиц износа  $D$  ( $мкм$ );
- элементный состав каждой износной частицы.

За счет импульсной регистрации сигнала в сцинтилляционном спектрометре снижены пределы обнаружения элементов на 2-3 порядка по сравнению с лучшими диагностическими спектрометрами МОА (фирма Baird), Spectroil (Spectro), что позволило уверенно регистрировать содержание металла в рабочем диапазоне 0,001...10 г/т. Погрешность измерения регистрируемых параметров в рабочем диапазоне их измерения составляет 3 ... 20 %.

Получение такого количества информации о частицах износа стало возможным потому, что был решен ряд принципиальных научно-технических вопросов.

1. В спектрометре применена оригинальная, патентованная конструкция СВЧ плазмотрона - источника возбуждения спектров, который позволил получить пропорциональную зависимость между аналитическим сигналом и размером частиц металлов в диапазоне 0 ... 60  $мкм$  [3].

2. Разработана конструкция ультразвукового распылителя, с помощью которого смазочное масло превращается в мелкодисперсный аэрозоль с размерами капель, не превышающими 5  $мкм$ . Этим исключается эффект присутствия в одной капле масла несколько металлических частиц и достигается правильность измерения элементного состава частиц [4].

3. Разработан способ одновременного измерения параметров сцинтилляционных импульсов, что позволило устанавливать элементный состав каждой частицы изнашивания [5].

4. Разработан способ двухшагового градуирования сцинтилляционного спектрометра, позволяющего отдельно измерять массовую долю элементов, находящихся в пробе масла в виде раствора и в виде частиц изнашивания [6].

В таблице 1 представлен протокол результатов анализа пробы масла исправного

двигателя, который автоматически распечатывается по завершении анализа.

Таблица 1. Протокол результатов измерения параметров частиц в 1 мл пробы масла исправного двигателя

Протокол № af3685

сцинтилляционного анализа частиц износа

Двигатель: д30ку154 №: 491425

Номер борта: 85637 СУ 2

Наработка ППР (часы) 179

Продукт отбора пробы: мс8п

Точка отбора пробы: ЗКП

Дата отбора пробы: 27.09.2002

Дата анализа: 04.10.2002

Количество параллельных ... 2

I. Параметры частиц износа

Эл-т	N	N <sub>пр</sub>	C <sub>p</sub>	C <sub>ц</sub>	C	D, мкм
Al	2	1	0	0,08	0,08	27,53
Cr	0	0	0	0	0	0
Ni	2	1,5	0	0	0	1,65
Mg	22	17	0	0,01	0,01	8,84
Fe	40	35,5	0	0,04	0,04	6,12
Cu	336	332	0,04	0,09	0,13	3,68
Ag	44,5	42,5	0	0,02	0,02	4,14
V	0	0	0	0	0	0

II. параметры сложных частиц

Состав

Количество

Mg-Fe- 3,5

Cu-Ag- 2

В таблице 1 следует обратить внимание на три момента:

1. В исправном двигателе количество частиц и содержания элементов имеют чрезвычайно низкие значения.

2. Частицы износа представлены, в основном, «простыми» одноэлементными частицами.

3. Состав сложных частиц не соответствует составу сплавов, применяемых в двигателях.

Сравнение двух протоколов показывает существенное их различие. Видно, что в таблице 2 наблюдаются катастрофические значения числа частиц меди, железа и серебра, большое количество и разнообразие сложных частиц.

Было выяснено, что исправный двигатель (см. табл. 1) всегда характеризуется низким числом частиц износа по всем определяемым элементам, в масле выделяются большей частью частицы, представляющие основу сплава, содержание металлической примеси основы сплава находится на уровне десятых долей граммов на тонну. Вероятность обнаружения в пробе масла легирую-

щих компонент (Cr, Ni, V) составляет менее 0,2 [7].

Таблица 2. Протокол сцинтилляционных измерений в 1 мл пробы масла с дефектного двигателя

Протокол № ur3065  
сцинтилляционного анализа частиц износа  
Двигатель: д30ку154 №: 494427  
Номер борта: 85807 СУ 1  
Наработка ППР (часы) 174  
Продукт отбора пробы: мс8п  
Точка отбора пробы: ЗКП  
Дата отбора пробы: 05.06.2002  
Дата анализа: 25.06.2002  
Количество параллельных ... 2  
I. Параметры частиц износа

Эл-т	N	N <sub>пр</sub>	C <sub>p</sub>	C <sub>ч</sub>	C	D, мкм
Al	52,5	46	0	0,5	0,5	18,4
Cr	8	4	0	0	0	4,3
Ni	9,5	1,5	0	0	0	2,7
Mg	134,5	114	0	0,04	0,04	6,5
Fe	1466,5	1287	1,5	2,1	3,6	7,1
Cu	11929	11563	1,5	6,1	7,6	4,8
Ag	1702,5	1482	0,3	5,9	6,2	8,6
V	0	0	0	0	0	0

II. Состав и количество сложных частиц

Состав	Количество
<b>Cu-Ag-</b>	<b>200,5</b>
<b>Fe-Cu-</b>	<b>145</b>
Fe-Ag-	15
<b>Mg-Cu-</b>	<b>9,5</b>
<b>Ni-Fe-</b>	<b>6</b>
<b>Fe-Cr-Ni</b>	<b>4</b>
<b>Fe-Cu-Ag-</b>	<b>2,5</b>

В случае возникновения и развития дефекта в масло во все большем количестве начинают поступать частицы сложного состава. При этом, повышенный износ подшипника, изготовленного, например, из стали ШХ-15 с бронзовым сепаратором, характеризуется на начальном этапе развития дефекта частицами Fe-Cu и частицами, типа Fe-Cr, Fe-Ni, Cr-Ni и. С увеличением износа в масло поступают частицы полного состава, типа Fe-Cr-Ni. Дальнейшие исследования показали, что обнаружение частиц Fe-Cu, Cu-Ag характеризует повышенный износ бронзовых и посеребренных сепараторов, а состав Fe-Cr-Ni – износ беговых дорожек и тел качения подшипников, изготовленных из стали ШХ-15.

Анализ результатов таблицы 2, с учетом сказанного выше, показывает, что наи-

более вероятен дефект двух подшипников. При этом, один из подшипников имеет бронзовый сепаратор, другой – бронзовый с нанесенным серебряным покрытием. Об этом свидетельствует большое количество зарегистрированных сложных частиц типа Fe-Cu и Cu-Ag, соответственно. Кроме того, зарегистрированы частицы состава Ni-Fe и частицы полного состава Fe-Cr-Ni, характеризующие повышенный износ беговых дорожек и тел качения подшипников, изготовленных из ШХ-15.

Показанный в таблице 2 двигатель был снят с эксплуатации и направлен на завод в ремонт. В состоянии доставки из эксплуатации с дозаправкой маслобака проведена гонка в течение 10 минут. Результаты заводского анализа пробы масла на МФС-4  $C_{Fe} = 1,87$  г/т,  $C_{Cu} = 2,1$  г/т. Однако, результаты разборки двигателя на НПО «Сатурн» показали увеличение зазора шарикового подшипника задней коробки приводов сверх технических условий (ТУ) на 0,038мм. Увеличенным также, но не вышедшим за ТУ, оказался радиальный зазор роликоподшипника компрессора высокого давления. Таким образом, прогноз технического состояния двигателя по результатам сцинтилляционных измерений подтверждается заводскими исследованиями двигателя.

Из сравнения результатов сцинтилляционных измерений массовой доли для железа и меди с заводскими, видно, что данные, полученные на МФС-4, занижены против сцинтилляционных в 2 и 3 с лишним раза, соответственно. Это объясняется тем, что для градуирования сцинтилляционного спектрометра применялся стандартный образец, изготовленный на основе натуральных частиц износа, т.е. образец, полностью соответствующий по физико-химическим свойствам анализируемой пробе, что гарантирует правильность измерения параметров частиц износа сцинтилляционным способом.

Опыт оценки технического состояния авиационных двигателей показал, что несмотря на низкие пределы обнаружения элементов, достигаемые сцинтилляционным способом, высокую информативность, достаточно часто дефект не обнаруживался в случае его возникновения в трансмиссионной части двигателя. Это связано с тем, что

при принятой схеме подачи масла к основным агрегатам двигателя частицы износа улавливаются основным маслофильтром и не поступают в коробку приводов, откуда сливается проба масла на анализ. Особенно сильно эффект отсутствия информативных частиц о процессах износа в трансмиссионной части двигателя проявляется при использовании 16 микронных маслофильтров типа PALL. Вывод очевиден – для точной оценки технического состояния двигателя необходимо учитывать параметры частиц износа, накапливаемых на маслофильтре.

Традиционная диагностика, основанная на измерении параметров частиц только в пробе масла базируется на том, что параметры частиц, циркулирующие в маслосистеме двигателя, достигают равновесного значения и не изменяются с наработкой двигателя. Величина абсолютных значений этих параметров связана с техническим состоянием узлов трения.

Маслофильтр является накопителем частиц и, в силу множества причин, абсолютные значения параметров не могут использоваться для оценки технического состояния двигателя. Поэтому, для количественной оценки параметров частиц, смытых с маслофильтра, использовался рейтинговый подход - количество частиц определенного сорта, приходящееся на 1000 частиц износа. Тем самым устранялось влияние времени накопления частиц на фильтре, степени разбавления пробы и т.д.

По результатам диагностирования исправных двигателей была накоплена достаточная статистика, которая позволила создать своего рода эталонный двигатель по параметрам частиц износа, измеренных сцинтилляционным способом, с учетом наработки и типа двигателя.

При оценке технического состояния двигателей полученный результат измерения  $\bar{X}$  сравнивали с граничными значениями статистической модели ( $\bar{X} + 2\sigma$ ) и ( $\bar{X} + 3\sigma$ ). Были приняты следующие критерии оценки:

$\bar{X} < (\bar{X} + 2\sigma)$  - двигатель исправен,  
 $(\bar{X} + 2\sigma) < \bar{X} < (\bar{X} + 3\sigma)$  - зона особого контроля, возможен повышенный износ агрегатов,  
 $\bar{X} \geq (\bar{X} + 3\sigma)$  - зона повышенного износа. В

зависимости от типа превысивших параметров, величины превышений могла быть рекомендована замена масла с последующей гонкой двигателя, либо досрочное его снятие с эксплуатации.

За период 2000 – 2004гг. сцинтилляционным методом было продиагностировано 90 двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154, имевших внешние признаки проявления дефектов маслосистемы [7]. В 85 случаях источник дефекта был определен по результатам сцинтилляционным измерений с точностью до узла (функциональной системы) и подтвержден в последствие при заводских исследованиях двигателя.

В 4 случаях двигатель ставился на «особый контроль». В дальнейшем эти двигатели и узлы (коробки приводов) были сняты с эксплуатации и при их исследовании:

- на трех двигателях были выявлены начальные очаги выкрашивания подшипников (2 двигателя – подшипники задней коробки приводов, 1 двигатель – роликподшипник турбины высокого давления);

- один двигатель снят с эксплуатации с определением источника образования стружки в коробке приводов. При исследовании выявлен дефект лабиринтных уплотнений, т.е. неверно определен источник стружки.

Таким образом, с использованием результатов измерения параметров частиц износа сцинтилляционным спектрометром найдены диагностические признаки раннего обнаружения дефектов, позволившие своевременно отстранить двигатель от эксплуатации. Отличительными особенностями разработанной методики диагностирования являются:

- найдены диагностические признаки раннего обнаружения дефектов подшипников. В начальной стадии развития дефекта повышенные параметры имеют частицы типа Fe-Cu, Cu-Ag, характеризующие за износ сепараторов;

- с развитием дефекта в маслосистему в увеличивающемся количестве с наработкой двигателя поступают частицы, типа Fe-Cu, Fe-Ni, Cr-V, т.е. фрагменты частиц полного состава сплава, а также частицы полного состава, например, Fe-Cr-Ni;

- определение элементного состава частиц позволило, в подавляющем большинстве случаев, идентифицировать дефектный узел;  
- разработана статистическая модель исправного двигателя по параметрам частиц в пробе масла с учетом типа и наработки двигателя. Определен алгоритм принятия диагностического решения.

#### **Список литературы**

1. Техническая справка № 44-596168. Анализ съёмов двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 по неисправностям узлов, смываемых смазочным маслом. ОАО «НПО «Сатурн», 2005. - 27с.  
2. Патент РФ № 2118815. Способ определения микропримесей металлов в смазочных

маслах, топливах и специальных жидкостях и устройство для его осуществления. 1998.

3. Патент РФ № 2082284. СВЧ плазмотрон циклонного типа. 1997.

4. Патент № 2119390. Ультразвуковой распылитель. 1998.

5. Патент № 2057324 «Способ определения минеральных форм и гранулометрического состава частиц минералов благородных металлов в порошковых пробах руд». 1996.

6. Патент № 2226685 «Способ спектрального анализа» 2004.

7. Русинов С.В. Диагностика узлов трения ГТД методом сцинтилляционного анализа примесей в масле. Автореферат дисс... канд. техн. наук, 2006.

## **ESTIMATION OF AVIATION ENGINES D-30KP/KU/KU-154 TECHNICAL CONDITION BY SCINTILLATION MEASURING**

© 2006 V.V. Buchmanov, V.V. Drovov, V.G. Drovov, Ju.D. Skudaev, A.A. Alkes

We suggest using the scintillation spectral method for estimation of technical state of the aircraft engines through the measurement of the wear particles parameters.

We present concrete examples when the method allows the unit-to-unit diagnostics of engine. The necessity is demonstrated to account the information on the wear particles collected at the main oil filter for the adequate diagnostics of the oil system.