

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-8-39-43

## ДИАГНОСТИКА УЗЛОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОМЫВАЕМЫХ СМАЗОЧНЫМ МАСЛОМ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПРОБЫ СМЫВА С ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СЛОЯ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТА

© Виктор Григорьевич Дроков<sup>1</sup>, Виктор Владиславович Дроков<sup>1</sup>,  
Владимир Валерьевич Мурышченко<sup>1</sup>, Фарит Ибраевич Мухутдинов<sup>2</sup>,  
Юрий Дмитриевич Скудаев<sup>1</sup>, Виталий Фердинандович Халиуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, г. Иркутск, Россия;  
e-mail: dtech.skudaev@yandex.ru

<sup>2</sup> АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия.

*Статья поступила 15 ноября 2017 г.*

Для повышения степени очистки масла в авиационных газотурбинных двигателях устанавливают тонкоячеистые одноразовые фильтроэлементы типа QA-07930-01 с диагностическим слоем в виде ленты из нетканого материала, которую можно снимать с фильтра, не прекращая его эксплуатацию, и получать информацию о накапливаемых на фильтре частицах изнашивания с интервалом через 200 ч. Для сбора диагностической информации разработаны методика и устройство извлечения частиц. Установлено, что первый смыв с ленты по количеству и составу частиц наиболее показателен для достоверной оценки технического состояния двигателя по параметрам частиц изнашивания. При этом полное время подготовки пробы к анализу, включая смыв, отстаивание, обработку в ультразвуковой ванне, составляет 90 мин. Представлены результаты оценки технического состояния маслосистемы двигателей ПС-90А, оснащенных фильтроэлементом с диагностическим слоем и без него. Полученные данные свидетельствуют, что фильтроэлемент QA-07930-01 существенно повышает удобство обслуживания авиационных двигателей и снижает издержки при проведении диагностических исследований.

**Ключевые слова:** фильтроэлемент; диагностическая лента; частицы изнашивания; статистическая модель; газотурбинный авиационный двигатель; диагностический признак; параметры частиц изнашивания.

## DIAGNOSTICS OF THE UNITS OF AVIATION GAS TURBINE ENGINES WASHED WITH LUBE LUBRICANT ACCORDING TO THE RESULTS OF THE FLUSH SAMPLE ANALYSIS OF THE DIAGNOSTIC LAYER OF FILTER ELEMENTS

© Viktor G. Drokov<sup>1</sup>, Viktor V. Drokov<sup>1</sup>, Vladimir V. Muryshchenko<sup>1</sup>,  
Farit I. Muhutdinov<sup>2</sup>, Yury D. Skudaev<sup>1</sup>, Vitaly F. Khalioullin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State University Applied Physics Institute, Irkutsk, Russia; e-mail: dtech.skudaev@yandex.ru

<sup>2</sup> JSC ODK-Aviadvigatel, Perm, Russia.

*Submitted November 15, 2017.*

Fine mesh disposable oil filters with a service life of 600 hours and more are used in aviation engines to increase the degree of oil purification. A diagnostic layer in form of a non-woven tape attached to the filter can be removed from the filter to keep up the filter in service. Information on the wear particles accumulated on the filter can be obtained each 200 h. Technique and device used for extracting wear particles from the diagnostic layer of a filter element of the type QA-07930-01 was developed. It is shown that the first flushing from the tape by the number and composition of particles is most indicative for a reliable assessment of the technical state of the engine by the parameters of the wear particles. The total time spent for analysis, including flushing, sedimentation, and treatment in an ultrasonic bath is 90 minutes. The results of assessing the technical condition of the oil system of PS-90A engines equipped with a filter element with and without a diagnostic layer are presented. The obtained data indicate that the filter element QA-07930-01 significantly improves the convenience of servicing the aircraft engines and reduces the costs of diagnostic tests.

**Keywords:** oil filter element; diagnostic tape; wear particles; statistical model; gas-turbine aviation engine; diagnostic feature; parameters of wear particles.

При оценке технического состояния маслосистемы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) достоверность результатов диагностики значительно повышается, если учитываются параметры частиц изнашивания при анализе пробы смыва с маслофильтра [1].

В последнее время на смену многоразовым сетчатым маслофильтрам с ячейками размером 40 – 70 мкм пришли одноразовые фильтроэлементы из нетканого материала с тонкостью фильтрации 10 – 15 мкм и ресурсом 600 – 1000 ч [2].

На рис. 1 представлен фильтроэлемент QA-07930-01 с диагностическим слоем Dirt Alert фирмы PALL. При контроле технического состояния ГТД слой разрезают на две ленты [3], что дает возможность (исследуя ленты поочередно) получать диагностическую информацию согласно установленному регламенту (через 200 и 400 ч с начала эксплуатации фильтроэлемента). Затем через 600 ч исследуют смыв непосредственно с фильтроэлемента. При этом на каждой стадии диагностики фильтроэлемент может быть снова установлен в двигатель и эксплуатироваться до выработки его ресурса.

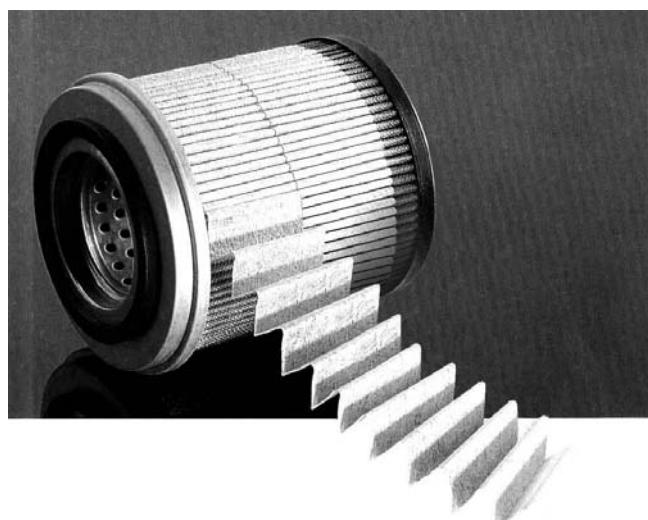
Цель работы — разработка методики извлечения частиц с фильтроэлемента, оснащенного диагностическим слоем, и оценка возможности использования полученной пробы смыва для диагностики узлов и сборочных единиц авиационных ГТД, омываемых маслом.

Для получения смыва с диагностической ленты фильтроэлемента QA-07930-01 разработали специальное лентопротяжное устройство (рис. 2). Сначала диагностическую ленту плотно наматывали на катушку, протягивали по корпусу устройства и закрепляли на второй катушке. Затем

устройство помещали в ультразвуковую ванну, предварительно на 2/3 заполненную нефрасом. После включения электродвигателя ленту с одной катушки перематывали на другую, проводя ее через нефрас и подвергая воздействию ультразвуковых колебаний. За счет кавитационных явлений частицы износа с ленты фильтроэлемента переходили в жидкость. По окончании перемотки (через 20 мин, длина ленты — 3 м) устройство вынимали из ванны, осадок в нефрасе тщательно перемешивали и сливали в емкость. Далее его отстаивали, нефрас осторожно удаляли. Полученный осадок разбавляли «чистым» маслом МС-8П. Пробу помещали в ультразвуковую ванну и перемешивали в течение 20 мин. Затем она поступала для анализа на сцинтилляционный анализатор.

При контроле технического состояния узлов трения авиадвигателя по результатам анализа пробы масла использование в качестве диагностических параметров абсолютных значений содержания элементов и количества частиц изнашивания [2] невозможно, поскольку они зависят от множества факторов, которые не поддаются оценке. Необходимо также учитывать, что в исправном двигателе в пробах масла и смыва всегда в больших количествах присутствуют одноэлементные («простые») частицы [4]. С возникновением и развитием повреждения (дефекта), напротив, в пробах растет число «сложных» частиц, состоящих из двух и более элементов.

Использовали следующие основные диагностические параметры:  $V_{\text{общ}}$  — отношение общего количества «сложных» частиц к общему числу «простых» (для определенного элемента —  $V_{\text{элем}}$ );  $R_0$ ,  $R_{\text{пр}}$ ,  $R_{\text{сл}}$  — доли количеств частиц изнашивания, содержащих определенный элемент (вклад частиц изнашивания по элементам), «простых» частиц изнашивания определенного состава



**Рис. 1.** Фильтроэлемент QA-07930-01 с диагностическим слоем



**Рис. 2.** Устройство для получения пробы смыва с диагностической ленты

(доля «простых» частиц изнашивания по элементам) и «сложных» частиц изнашивания определенного состава (доля «сложных» частиц определенного состава) в общем числе частиц изнашивания;  $G$  — количество составов «сложных» частиц.

Техническое состояние ГТД оценивали с помощью статистической эталонной модели (ЭСМ) исправного двигателя по параметрам частиц изнашивания, которые рассчитывали как количество частиц, приходящихся на 1000 зарегистрированных. Границные значения определяли следующим образом.

Очевидно, что исправные двигатели характеризуются разбросом параметров, зависящим от качества изготовленных деталей, условий эксплуатации и др. Погрешность результатов анализа также вносит свой вклад в значение величины дисперсии  $\sigma$ . Согласно формальному сложению дисперсий

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{износа}}^2 + \sigma_{\text{анализа}}^2, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{износа}}^2$ ,  $\sigma_{\text{анализа}}^2$  — дисперсии распределения износа двигателя и погрешности анализа.

Учитывая, что  $\sigma_{\text{износа}}^2 > \sigma_{\text{анализа}}^2$ , можно утверждать, что в диапазоне результатов измерений от нуля до верхней границы  $\bar{X} + \sigma$  входит  $(68 + + 32/2)\%$  всех исправных двигателей (вне границы — 32 %), в диапазоне  $\bar{X} + 2\sigma$  —  $(95 + 5/2)\%$  (вне границы — 5 %) и в диапазоне  $\bar{X} + 3\sigma$  — все 100 % исправных двигателей. Другими словами, за границей  $(\bar{X} + 3\sigma)$  исправные двигатели практически отсутствуют ( $\bar{X}$  — среднее значение параметра, которое определяется видом функции распределения).

В табл. 1 приведена ЭСМ по параметрам частиц изнашивания исправного ГТД ПС-90А, укомплектованного фильтроэлементом QA-07930 без диагностического слоя.

Исследовали фильтроэлементы с диагностическим слоем, разделенным на две ленты (верхнюю и нижнюю), с десяти находящихся в эксплуатации двигателей ПС-90А. Интервал отбора проб составлял  $300 \pm 50$  ч (при наработке 300 ч снимали верхнюю диагностическую ленту, через 600 ч — нижнюю, а после 900–1000 ч — сам фильтр и анализировали смыв непосредственно с фильтра).

С каждой ленты осуществляли по три последовательных смыва. Наибольшее количество частиц износа фиксировали в первом смыве (в ходе подготовки к анализу его приходилось разбавлять более чем в 10 раз). Во втором (разбавление в 3–4 раза) и третьем (без разбавления) частиц наблюдали значительно меньше. Также для каж-

кой ленты анализировали суммарный смыв (от каждого из трех смызов брали по 3 мл, сливали в одну емкость, обрабатывали в ультразвуковой ванне в течение 30 мин) на спектральном анализаторе. Результаты приведены в табл. 2 и 3.

**Таблица 1.** ЭСМ исправного ГТД ПС-90А с фильтроэлементом QA-07930 (по результатам 77 анализов проб смынов с фильтроэлементом без учета наработки двигателя)

Параметр	Состав	$\bar{X}$	$\bar{X} + 2\sigma$	$\bar{X} + 3\sigma$
$R_0$	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
$R_{\text{пп}}$	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
$R_{\text{сл}}$	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
$V_{\text{элем}}$	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
	Cu	0,19	0,58	1,12
	Mg	0,42	0,77	1,06
	Ag	0,46	1,58	3,4
$V_{\text{общ}}$	—	0,43	0,82	1,02
$G$	—	82,64	121,83	141,42

Видно, что в большинстве случаев значения  $V_{\text{общ}}$  и  $V_{\text{элем}}$  в первом смыве превышают либо равны (в пределах погрешности измерений) в суммарном смыве (см. табл. 2). Поэтому диагностическое решение следует принимать по данным именно первого смыва. Исключение составляют результаты по хрому (двигатель № 00-012). Превышение  $V_{\text{общ}}$  в суммарной пробе в 1,2 – 2,4 раза, вероятнее всего, связано с остатками технологических частиц в маслосистеме после сборки двигателя.

Для оценки возможности диагностики технического состояния узлов трения ГТД, оснащенных фильтроэлементом с диагностическим слоем, с помощью ЭСМ (см. табл. 1), проанализировали 12 лент (первый смыв) с шести двигателей (см. табл. 3).

Очевидно, что для использования ранее разработанной ЭСМ необходимо, чтобы ни один из измеренных параметров не выходил за пределы  $\bar{X} + 3\sigma$  (в идеале —  $\bar{X} + 2\sigma$ ).

Из полученных результатов сцинтиляционных исследований проб (см. табл. 3) видно, что только в одном случае параметр  $V_{\text{элем}}$  выходит за границы  $\bar{X} + 3\sigma$  (Al, двигатель 00-030). В остальных случаях превышений не наблюдали.

Аналогичные исследования провели и для параметров  $R_0$ ,  $R_{\text{пр}}$ . Установили, что практически для всех двигателей  $R_0$  и  $R_{\text{пр}}$  превышают граничные значения  $\bar{X} + 2\sigma$  (но не выходят за границу  $\bar{X} + 3\sigma$ ) соответствующих параметров ЭСМ исправного ГТД ПС-90А с фильтроэлементом без диагностического слоя.

Таким образом, для диагностики ГТД ПС-90А с фильтроэлементом QA-07930-01 с диагностическим слоем Dirt Alert можно использовать ранее разработанную ЭСМ исправного двигателя с фильтроэлементом QA-07930 без диагностического слоя. Разделение диагностического слоя на две ленты позволяет диагностировать ГТД без замены основного маслофильтра. Для оценки технического состояния маслосистемы

**Таблица 2.** Значения параметров частиц износа  $V_{\text{общ}}$  и  $V_{\text{элем}}$  для первого и суммарного смызов

№ двигателя	Смыв	$V_{\text{общ}}$	$V_{\text{элем}}$						
			Al	Cr	Ni	Mg	Fe	Cu	Ag
00-025 (верхняя лента)	Первый	0,12	0,47	2,85	0,19	0,18	0,45	0,03	0,10
	Суммарный	0,12	0,53	1,82	0,16	0,14	0,38	0,04	0,12
	$\sigma$	0,087	0,139	0,435	0,290	0,105	0,103	0,017	0,034
00-012 (верхняя лента)	Первый	0,22	0,58	2,94	0,84	0,43	0,63	0,08	0,33
	Суммарный	0,09	0,37	3,71	0,27	0,26	0,37	0,04	0,20
	$\sigma$	0,061	0,104	0,925	0,233	0,147	0,110	0,019	0,055
00-012 (нижняя лента)	Первый	0,05	0,40	2,29	0,43	0,25	0,45	0,01	0,10
	Суммарный	0,08	0,40	5,40	0,39	0,20	0,43	0,02	0,18
	$\sigma$	0,051	0,099	1,278	0,115	0,037	0,043	0,018	0,097
20-010 (верхняя лента)	Первый	0,09	0,49	1,66	0,44	0,19	0,29	0,03	0,18
	Суммарный	0,07	0,38	0,92	0,32	0,18	0,28	0,02	0,11
	$\sigma$	0,020	0,154	2,735	0,142	0,083	0,064	0,008	0,269
00-033 (верхняя лента)	Первый	0,08	0,60	3,21	0,44	0,20	0,27	0,02	0,17
	Суммарный	0,08	0,64	3,69	0,44	0,20	0,19	0,02	0,18
	$\sigma$	0,043	0,166	0,610	0,269	0,057	0,082	0,015	0,181

**Таблица 3.** Значения параметров частиц износа  $V_{\text{общ}}$  и  $V_{\text{элем}}$  (числитель — верхняя лента, знаменатель — нижняя)

№ двигателя	Наработка, ч	$V_{\text{общ}}$	$V_{\text{элем}}$						
			Al	Cr	Ni	Mg	Fe	Cu	Ag
00-005	316/614	0,03/0,04	0,76/0,84	6,00/2,33	0,19/0,34	0,15/0,31	0,14/0,18	0,01/0,02	0,09/0,18
00-030	302/621	0,14/0,07	3,57/3,64	0,74/0,49	0,53/0,61	0,38/0,49	0,27/0,24	0,07/0,02	0,59/0,27
00-031	316/613	0,05/0,05	0,67/0,49	1,81/1,56	0,70/1,04	0,28/0,42	0,25/0,22	0,02/0,02	0,22/0,17
00-039	343/667	0,07/0,06	0,35/1,07	3,63/1,96	1,11/1,75	0,22/0,28	0,14/0,28	0,02/0,02	0,15/0,27
00-052	302/621	0,09/0,06	0,45/0,32	5,00/0,00	1,87/1,47	0,24/0,21	0,25/0,23	0,04/0,03	0,26/0,24
00-088	343/666	0,10/0,09	2,24/0,56	2,11/2,77	1,16/1,01	0,37/0,27	0,31/0,17	0,04/0,03	0,36/0,26

МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ТОЛЬКО ПЕРВЫЙ СМЫВ С ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТА.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2251674 РФ, 7G01 M15/00, G01 N3/56, Способ оценки технического состояния подшипников трансмиссии авиационных двигателей / Гайдай М. С. и др.; заявитель и патентообладатель НПО «Сатурн», ООО «Диагностические технологии». — № 2002132524; заявл. 03.12.2002; опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13.
2. Пат. 2164344 РФ, G01 M15/00, Способ контроля и прогнозирования состояния газотурбинных двигателей, преимущественно двигателей с межвальными подшипниками / Заринский С. П. и др.; заявитель и патентообладатель Летно-исследовательский институт им. М. М. Громова. — № 98121374/06; заявл. 24.11.1998; опубл. 20.09.2000. Бюл. № 13.
3. Пат. 92357 ПМ, РФ, 7G01 M15/00, G01 N3/56, Фильтр / Макаров В. П. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Авиадвигатель». — № 200943385/22; заявл. 23.12.2009; опубл. 20.03.2010.
4. **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 тех-

нического состояния авиационных ГТД по результатам спектральных измерений / Контроль. Диагностика. 2012. № 9(159). С. 20 – 28.

## REFERENCES

1. RF Pat. 2251674, 7G01 M15/00, G01 N3/56, Technique for aircraft engines transmission bearings technical condition evaluation / Gaidai M. S. et al.; applicant and owner NPO «Saturn», JSC «Diagnosticheskie tekhnologii». — <sup>1</sup> 2002132524; appl. 03.12.2002; publ. 10.05.2005. Byull. N 13 [in Russian].
2. RF Pat. 2164344, 7G01 M15/00, G01 N3/56, Method for monitoring and forecasting the state of gas turbine engines, mainly engines with inter-shaft bearings / Zaritskii S. P. et al.; applicant and owner Letno-issledovatel'skii institut im. M. M. Gromova. — N 98121374/06; appl. 24.11.1998; publ. 20.09.2000. Byull. N 13 [in Russian].
3. RF Pat. 92357, 7G01 M15/00, G01 N3/56, Filter / Makarov V. P. et al.; applicant and owner OAO «Aviadvigatel'». — N 200943385/22; appl. 23.12.2009; publ. 20.03.2010.
4. **Inozemtsev A. A., Drokov V. G., Drokov 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].