



## Методика трибодиагностики двигателей Д-30КУ/КП с применением СВЧ плазменного комплекса: результаты метрологической экспертизы и анализа точности

**А.А. Богоявленский,**  
докт. техн. наук,  
старший научный сотрудник,  
член-корреспондент  
Метрологической академии,  
главный метролог

**А.Е. Боков,**  
старший инженер отдела главного  
метролога

ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (ФГУП ГосНИИ ГА), г. Москва

В практике авиационной деятельности на отечественном воздушном транспорте (ВТ) широко применяются магнитный, эмиссионный спектральный и особенно рентгеноспектральный методы трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), разработка вопросов обеспечения единства измерений и метрологического обеспечения которых изложена в [1–6]. В настоящее время лаборатории технической диагностики эксплуатирующих организаций гражданской авиации (ГА) для измерения концентрации продуктов изнашивания в работающих авиамаслах оснащены рентгеноспектральными анализаторами БАРС-3, БРА-17–02, БРА-18, АДК «Призма», Спектроскан МАХ и Спектроскан МАХ GV, разработанными и произведенными тремя независимыми отечественными производителями.

Другой отечественный разработчик предлагает применять в авиационной трибодиагностике сверхвысокочастотный плазменный комплекс на основе сцинтилляционного анализатора САМ-ДТ-01–2 (рис. 1).

Особенностью применения сверхвысокочастотного плазменного комплекса на основе сцинтилляционного анализатора САМ-ДТ-01–2 является возможность измерения, помимо концентрации продуктов изнашивания в принятом в авиационном сообществе понимании, еще и гранулометриче-

ского и химического состава частиц изнашивания, а также их количества. Рассматриваемая в статье «Методика диагностирования двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным комплексом» (далее – Методика диагностирования) предназначена для выявления неисправностей узлов и агрегатов двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154, омываемых смазочным маслом, и прогнозирования их технического состояния на последую-

щий регламентированный период времени.

Участие института в разработке Методики диагностирования заключалось в проведении метрологической экспертизы ее и нормативных документов по эксплуатации, обеспечению единства измерений и метрологическому обеспечению сверхвысокочастотного плазменного комплекса на основе сцинтилляционного анализатора САМ-ДТ-01–2 для трибодиагностики авиационных ГТД, а также в проведении анализа состояния метрологического обеспечения

**Ключевые слова:** авиационные ГТД семейства Д-30КУ/КП, трибодиагностика, методика диагностирования, комплекс плазменный сверхвысокочастотный, анализатор сцинтилляционный, обеспечение единства измерений, метрологическое обеспечение, метрологические риски, метрологическая экспертиза.

**Keyword:** aviation GTE of the D-30KU/KP family, tribodiagnostic, diagnostic methods, ultra-high-frequency plasma complex, scintillation analyzer, ensuring the unity of measurements, metrological support, metrological risks, metrological examination.

# МЕТОДИКА ТРИБОДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ Д-30КУ/КП С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ ПЛАЗМЕННОГО КОМПЛЕКСА: РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ И АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ



Рис. 1  
Общий вид сверхвысокочастотного плазменного комплекса на основе сцинтилляционного анализатора САМ-ДТ-01-2

и обеспечения единства измерений, оценке прослеживаемости результатов измерений диагностических параметров.

## Поэлементная блок-схема

Метрологическая экспертиза, анализ состояния метрологического обеспечения и обеспечения единства измерений проведены на основе системного подхода согласно поэлементной блок-схеме, разработанной ФГУП ГосНИИ ГА и представленной на рисунке 2. Из блок-схемы видно, что Методика диагностирования через отбираемые пробы масел и измеряемые в них диагностические параметры находится в непосредственной связи с каждым из экземпляров авиационных ГТД семейства Д-30КУ/КП. К диагностическим параметрам относятся концентрация продуктов изнашивания и гранулометрический состав частиц изнашивания. Очевидной является необходимость достоверного измерения значений величин диагностических параметров с последующим прогнозированием на их основе технического состояния двигателей. Отдельно на рисунке 2 выделен блок «МО и ОЕИ» («Метрологическое обеспечение и обеспечение единства из-

мерений»), во главе которого находится комплекс СВЧ плазменный в составе: анализатор САМ ДТ-01-2, его программное обеспечение и применяемые методики измерений диагностических параметров. Прослеживаемость измерений обеспечивается за счёт привязки анализатора САМ ДТ-01-2 через стандартные образцы к государственным поверочным схемам соответствующих видов измерений.

## Метрологическая экспертиза и анализ состояния метрологического обеспечения

Методика диагностирования двигателей прошла метрологическую экспертизу вместе с комплектом связанных с ней нормативных и эксплуатационных документов

на стандартные образцы; а также сцинтилляционный анализатор САМ-ДТ-01-2 и его неавтономное программное обеспечение; методики измерений и другие объекты и элементы (всего 34 документа).

Метрологическая экспертиза проведена специалистами метрологической службы ФГУП ГосНИИ ГА на основании договора с ООО «Диагностические технологии» (г. Иркутск) в соответствии с [7], РМГ 63 [8], ОСТ 54-3-156.66 [9] и ОСТ 1 00221 [10], в рамках которой выполнен также анализ состояния метрологического обеспечения и обеспечения единства измерений.

## Стандартные образцы

Для проведения метрологического обслуживания плазменного сверхвысокочастотного комплекса

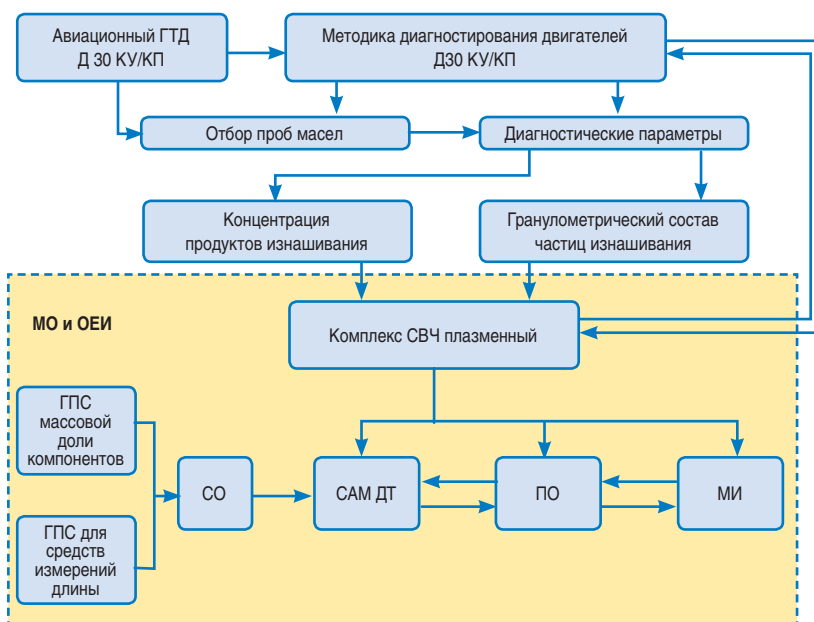


Рис. 2

Блок-схема проведения метрологической экспертизы, анализа состояния метрологического обеспечения и обеспечения единства измерений «Методики диагностирования двигателей Д-30КУ/КП»: МО и ОЕИ – метрологическое обеспечение и обеспечение единства измерений; ГПС – государственная поверочная схема; СО – стандартные образцы; САМ ДТ – сцинтилляционный анализатор САМ-ДТ-01-2; ПО – программное обеспечение; МИ – методики измерений

на основе сцинтилляционного анализатора САМ-ДТ-01–2 применяются два типа стандартных образцов ранга «государственный стандартный образец»: ГСО 10695–2015 и ГСО 10696–2015. Каждый прошел государственные испытания как тип, внесен в государственный реестр и предназначен для аттестации методик измерений, контроля точности результатов измерений содержания металлов в маслах; метрологического обслуживания (поверка, калибровка) средств измерений массовой доли металлов в маслах, контроля метрологических характеристик средств измерений при их испытаниях, в том числе с целью утверждения типа.

При этом ГСО 10695–2015 является стандартным образцом массовой доли элементов в нефтепродуктах (МДЭН). Стандартный образец приготовлен на основе масла синтетического гидрокарбонowego объемом  $(200 \pm 2)$  см<sup>3</sup>. Он содержит 21 химический элемент, из них только одиннадцать, показанных в таблице 1 вместе с аттестованными значениями аттестуемой характеристики и границами относительной погрешности аттестованных значений для доверительной вероятности  $P_d = 0,95$ , применяются в трибодиагностике авиационных ГТД. ГСО 10696–2015 является стандартным образцом состава частиц продуктов изнашивания авиационного газотурбинного двигателя (СОЧПИ ГТД).

Стандартный образец представляет собой сухой порошок, состоящий из твердых частиц продуктов изнашивания – материала, отделяемого с поверхности твердого тела (авиационного газотурбинного двигателя) при трении, размером не более 60 мкм. Он содержит восемь химических элементов (таблица 2) вместе с аттестованными значениями

**Таблица 1**

Аттестуемая характеристика ГСО 10695–2015 (МДЭН)

| Обозначение элемента   | Аттестованные значения массовой доли элемента в нефтепродуктах, млн <sup>-1</sup> | Границы относительной погрешности аттестованных значений ( $P_d = 0,95$ ), % |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Ag, Cu, Mg, Mn, Mo, Ni | 9,24–9,92                                                                         | ± (1,5–1,8)                                                                  |
| Al, Cr, Fe, Ti, V      | 10,02–10,61                                                                       |                                                                              |

**Таблица 2**

Аттестуемая характеристика ГСО 10696–2015 (СОЧПИ ГТД)

| Обозначение элемента | Массовая доля элементов, % | Границы относительной погрешности аттестованных значений ( $P_d = 0,95$ ), % |
|----------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Ag, Ni, Cr           | 0,23–0,57                  | ± (3,9–6,1)                                                                  |
| Al, Cu, Mg           | 1,27–3,15                  | ± (1,2–6,9)                                                                  |
| Fe                   | 6,24                       | ± 2,1                                                                        |
| V                    | 0,03                       | ± 2,1                                                                        |

ями аттестуемой характеристики и границами их относительной погрешности для доверительной вероятности  $P_d = 0,95$ . Аттестуемой метрологической характеристикой СОЧПИ ГТД является массовая доля элемента, %, в расчете на материал, высушенный при 105 °С.

## Анализатор сцинтилляционный САМ-ДТ-01–2

Для проверки диапазона и абсолютной погрешности измерений массовой доли элементов в растворенном виде подготавливают поверочные растворы CON на основе ГСО 10695–2015 (МДЭН). Для этого его разбавляют «чистым» авиационным маслом марки МС-8П до требуемых массовых долей элементов. Выполняется не менее пяти измерений массовой доли Si, Fe, Mg для каждого из поверочных растворов. По результатам измерений для каждого металла и каждого поверочного раствора CON вычисляется среднее арифметическое значение массовой доли элементов в анализируемом масле в виде раствора и его абсолютная погрешность.

Для проверки диапазона и абсолютной погрешности измерений массовой доли элементов в растворенном виде и твердых частицах готовят поверочные растворы МОС на основе ГСО 10696–2015 (СОЧПИ ГТД). При этом образцы ПР МОС изготавливают из исходного образца ПР МОС-10 с высоким содержанием элементов-примесей, например, номинальное значение массовой доли меди 10 млн<sup>-1</sup> (г/т). Выполняется по пять измерений массовой доли Cu, Fe, Mg, Ag, Ni, Cr в твердых частицах анализируемого масла для каждого из поверочных растворов МОС. По результатам измерений для каждого металла и каждого поверочного раствора МОС вычисляются средние арифметические значения массовой доли элементов в растворенном виде и твердых частицах в анализируемом масле и их абсолютные погрешности. При этом в качестве аттестованных значений и их погрешностей используют значения для поверочных растворов МОС. Полученные значения абсолютной погрешности измерений массовой доли элементов, находящихся в анализируемом масле в виде твердых металлических ча-

# МЕТОДИКА ТРИБОДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ Д-ЗОКУ/КП С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ ПЛАЗМЕННОГО КОМПЛЕКСА:

## РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ И АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ

стиц, должны удовлетворять требованиям таблицы 3.

### Программное обеспечение

Неавтономное программное обеспечение (ПО) СВЧ плазменного комплекса имеет идентификационное наименование «Регистрация» и служит для управления им в процессе измерения параметров металлических примесей в жидких пробах с последующей регистрацией, обработкой, систематизацией и хранением полученных результатов.

ПО «Регистрация» выполняет функции: автоматизация управления элементами СВЧ плазменного комплекса; вывод результатов измерений на экран и запись их в автоматизированную базу данных «Диагностика»; непрерывный мониторинг параметров проведения измерений; обеспечение возможности выбора и настройки параметров проведения измерений. Вид окна «Экспозиция» ПО «Регистрация» при анализе пробы № 14 094 приведен на рисунке 3.

Пользователь ПО «Регистрация» интегрируется для работы с ним в части просмотра, добавления и изменения записей базы данных. Для управления анализатором САМ-ДТ-01-2 связь с контроллерным блоком реализована по схеме Р2Р, данные передаются в формате WAKE. Оценка защиты и идентификации программного обеспечения производится перед поверкой анализатора, для чего сверяются идентификационные данные ПО (в том числе, идентификационное наименование и номер версии) изменений в результаты измерений.

ПО «Регистрация» прошло тестирование и метрологическую аттестацию в процессе утверждения

Таблица 3

Абсолютные погрешности измерений массовой доли элементов в растворенном виде, твердых частицах, в растворенном виде и твердых частицах

| Элемент | Диапазон D / абсолютная погрешность $\Delta_{ABC}$ | Состояние                              |                                       |                                                           |
|---------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|         |                                                    | В растворенном виде, млн <sup>-1</sup> | В твердых частицах, млн <sup>-1</sup> | В растворенном виде и твердых частицах, млн <sup>-1</sup> |
| Fe      | D                                                  | от 0,3 до 3,0                          | от 0,5 до 6,9                         | от 0,09 до 9,9                                            |
|         | $\Delta_{ABC}$                                     | $\pm 0,3$                              | $\pm (0,36 + 0,33 \cdot C_x)$         | $\pm (0,06 + 0,33 \cdot C_x)$                             |
| Cu      | D                                                  | от 0,2 до 3,0                          | от 0,35 до 2,1                        | от 0,05 до 5,1                                            |
|         | $\Delta_{ABC}$                                     | $\pm 0,2$                              | $\pm (0,22 + 0,33 \cdot C_x)$         | $\pm (0,02 + 0,33 \cdot C_x)$                             |
| Mg      | D                                                  | от 0,3 до 3,0                          | от 0,6 до 1,2                         | от 0,05 до 4,2                                            |
|         | $\Delta_{ABC}$                                     | $\pm 0,3$                              | $\pm (0,33 + 0,4 \cdot C_x)$          | $\pm (0,025 + 0,4 \cdot C_x)$                             |
| Ag      | D                                                  | —                                      | —                                     | от 0,02 до 0,4                                            |
|         | $\Delta_{ABC}$                                     | —                                      | —                                     | $\pm (0,01 + 0,93 \cdot C_x)$                             |
| Ni      | D                                                  | —                                      | —                                     | от 0,05 до 0,25                                           |
|         | $\Delta_{ABC}$                                     | —                                      | —                                     | $\pm (0,015 + 0,88 \cdot C_x)$                            |
| Cr      | D                                                  | —                                      | —                                     | от 0,12 до 0,70                                           |
|         | $\Delta_{ABC}$                                     | —                                      | —                                     | $\pm (0,06 + 0,5 \cdot C_x)$                              |

Примечание:

$\Delta_{ABC}$  — пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений массовой доли конкретного химического элемента, млн<sup>-1</sup>;

$C_x$  — измеренное значение массовой доли конкретного химического элемента, млн<sup>-1</sup>.



Рис. 3

Вид окна «Экспозиция» ПО «Регистрация» при анализе пробы № 14 094

типа средства измерений и в основном соответствует ГОСТ Р 8.654–2015. Таким образом, отсутствует возможность внесения преднамеренных и (или) непреднамеренных

искажений в результаты измерений диагностических параметров со стороны программного обеспечения СВЧ плазменного комплекса и работающего с ним персонала.

## Методики измерений

Методики измерений устанавливают процедуру измерений концентраций и средних эффективных диаметров металлических износных частиц различного элементного состава в смазочном масле авиационного ГТД в диапазоне от 0,2 до 4 000 см<sup>-3</sup> и от 5 до 40 мкм. Она обеспечивает выполнение измерений указанных величин для частиц любого элементного состава с погрешностью ( $P_d = 0,95$ ) для среднего арифметического из трех измерений, не превышающей значений, приведенных в таблице 4.

## Методика диагностирования

Рейтинги и показатели износа  $R_{\text{общ.}}$ ,  $R_{\text{прост.}}$ ,  $R_{\text{сл.}}$ ,  $V_{\text{общ.}}$ ,  $V_{\text{элем.}}$  в Методике диагностирования определяются расчетным путем по функциям, переменными в которых являются измеренные величины диагностических параметров. При помощи сцинтилляционного анализатора в пробе смыва с основного фильтроэлемента (одновременно по каждому из восьми элементов) определяют абсолютные и относительные параметры частиц изнашивания: количество частиц изнашивания, содержащих данный элемент в аналитической навеске  $N$ , см<sup>-3</sup>; количество простых частиц, состоящих из одного элемента  $N_{\text{пр}}$ , см<sup>-3</sup>; общее количество зарегистрированных частиц всех элементов в пробе  $N_{\text{общ}} = \sum N_i$ , где  $N_i$  – количество частиц каждого из определяемых элементов; количество частиц изнашивания, содержащих два и более элементов в навеске  $N_{\text{сл}}$ , см<sup>-3</sup>.  $N$ ,  $N_{\text{общ}}$ ,  $N_{\text{пр}}$  и  $N_{\text{сл}}$  являются промежуточными параметрами и служат для последующего расчета рейтингов и показателей

Таблица 4

Пределы допускаемой относительной погрешности методики измерений концентрации и размера частиц изнашивания

| Измерения концентрации частиц                          |      |                                                                                         | Измерения размера частиц                                                   |      |                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Диапазон измерений концентрации $n$ , см <sup>-3</sup> |      | Предел допускаемой относительной погрешности измерений, $\pm \Delta\%$ ( $P_d = 0,95$ ) | При измеренной концентрации частиц $n_{\text{общ.эл.}}$ , см <sup>-3</sup> |      | Предел допускаемой относительной погрешности измерения $d_{\text{ср.эфф.эл.}}$ , мкм, $\pm \Delta, \%$ ( $P_d = 0,95$ ) |
| от                                                     | до   |                                                                                         | от                                                                         | до   |                                                                                                                         |
| 0,2                                                    | 0,4  | -100 + 260                                                                              | 5                                                                          | 6    | 80                                                                                                                      |
| 0,4                                                    | 1,0  | -90 + 200                                                                               | 6                                                                          | 15   | 60                                                                                                                      |
| 1,0                                                    | 1,5  | -70 + 160                                                                               | 15                                                                         | 40   | 40                                                                                                                      |
| 1,5                                                    | 2,0  | -60 + 120                                                                               | 40                                                                         | 280  | 30                                                                                                                      |
| 2,0                                                    | 3,0  | -50 + 100                                                                               | 280                                                                        | 2800 | 20                                                                                                                      |
| 3,0                                                    | 4,5  | 100                                                                                     | 2800                                                                       | 4000 | 18                                                                                                                      |
| 4,5                                                    | 6    | 90                                                                                      | –                                                                          | –    | –                                                                                                                       |
| 6                                                      | 9    | 80                                                                                      | –                                                                          | –    | –                                                                                                                       |
| 9                                                      | 20   | 70                                                                                      | –                                                                          | –    | –                                                                                                                       |
| 20                                                     | 60   | 60                                                                                      | –                                                                          | –    | –                                                                                                                       |
| 60                                                     | 200  | 50                                                                                      | –                                                                          | –    | –                                                                                                                       |
| 200                                                    | 4000 | 45                                                                                      | –                                                                          | –    | –                                                                                                                       |

износа. Среди них вклад общего количества частиц изнашивания, содержащих данный элемент (нормированного на 1000 см<sup>-3</sup> всех частиц, зарегистрированных в данной пробе):  $R_{\text{общ}} = N / N_{\text{общ}} \cdot 1000$ ; вклад количества простых частиц изнашивания, состоящих только из данного элемента (нормированного на 1000 см<sup>-3</sup> всех частиц, зарегистрированных в данной пробе):  $R_{\text{пр}} = N_{\text{пр}} / N_{\text{общ}} \cdot 1000$ ; вклад состава сложных частиц (нормированного на 1000 см<sup>-3</sup> частиц, зарегистрированных в данной пробе):  $R_{\text{сл}} = N_{\text{сл}} / N_{\text{общ}} \cdot 1000$ ; отношение количества сложных частиц, содержащих данный элемент к количеству простых частиц, состоящих только из данного элемента (эле-

ментный параметр изнашивания):  $V_{\text{элем}} = N_{\text{сл}} / N_{\text{пр}}$ ; отношение всех сложных частиц к количеству всех простых частиц, состоящих только из одного элемента (интегральный параметр изнашивания):  $V_{\text{общ}} = \sum V_{\text{элем}}$ .

Полученные при этом значения рейтингов и показателей износа являются результатами косвенных измерений, а оценка суммарных погрешностей рейтингов методически выполняется с учетом частных производных функции определения конкретного рейтинга и погрешностей измерения входящих в функцию диагностических параметров. На рисунке 4 графически показана функциональная зависимость погрешности определения рейтингов

# МЕТОДИКА ТРИБОДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ Д-ЗОКУ/КП С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ ПЛАЗМЕННОГО КОМПЛЕКСА:

## РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ И АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ

и показателей износа от гранулометрического состава (количества) частиц изнашивания, которая имеет характер регрессии.

### Прослеживаемость измерений

Прослеживаемость измерений – свойство эталона единицы величины, средства измерений или результата измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном или национальным первичным эталоном иностранного государства соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений [11].

В процессе проведения метрологической экспертизы для проверки обеспечения прослеживаемости результатов измерений анализатора САМ-ДТ-01-2 на основе государственных поверочных схем (ГПС) по МИ 2639 [12] массовой доли компонентов в веществах и материалах (рис. 5) и ГПС для средств измерений длины в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-9}$  до 100 м [13] выстроены локальные схемы метрологического обслуживания.

Рисунок 5 показывает, что применительно к единице физической величины массовой доли компонентов в веществах подтверждается установление связи анализа-

тора с установкой высшей точности для воспроизведения единицы массовой доли основного вещества. Связь осуществляется через рабочие эталоны 1, 2 и 3 разрядов. Аналогичная локальная схема метрологического обслуживания выстроена на основе ГПС для средств измерений длины [13], которая также подтверждает наличие связи САМ-ДТ-01-2, но уже с государственным первичным эталоном длины – метра, через рабочие эталоны 1 и 2 разрядов. Таким образом, обеспечивается прослеживаемость измерений массовой доли компонентов в веществах и размеров частиц изнашивания при эксплуатации САМ-ДТ-01-2.

### Выводы

«Методика диагностирования двигателей Д-ЗОКУ/КП2/КУ/КУ-154 при измерении параметров частиц изнашивания в пробах масел и смывов с маслофильтров СВЧ плазменным комплексом» вместе с комплектом связанных с ней нормативных и эксплуатационных документов на стандартные образцы, сцинтилляционный анализатор САМ-ДТ-01-2 и его неавтономное программное обеспечение, методики измерений и другие объекты и элементы (всего 34 документа) успешно прошли метрологическую экспертизу во ФГУП ГосНИИ ГА. Отмеченные в процессе ее

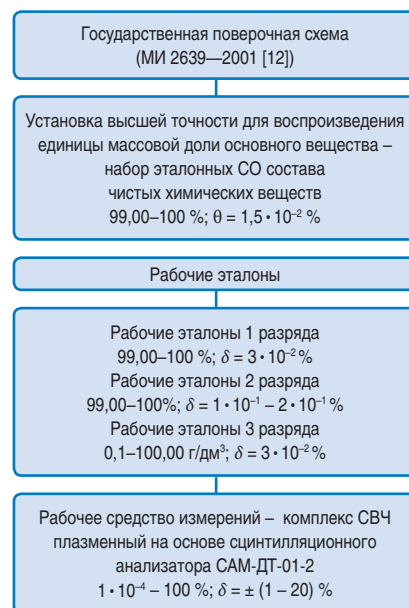


Рис. 5  
Прослеживаемость измерений массовой доли  
компонентов в веществах комплексом СВЧ  
плазменным на основе анализатора САМ-ДТ-01-2

проведения несоответствия в части нормированных величин погрешностей (показателей норм точности), процедур и последовательности отдельных операций диагностирования, обозначений единиц физических величин, терминологии устранены в полном объеме.

Для проверки (оценки) прослеживаемости результатов измерений на основе государственных поверочных схем (ГПС) по МИ 2639 [12] массовой доли компонентов в веществах и материалах, а также ГПС для средств измерений длины в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-9}$  до 100 м [13] выстроены локальные схемы метрологического обслуживания анализатора САМ-ДТ-01-2, подтверждающие связи с государственными первичными эталонами.

Рейтинги и показатели износа  $R_{\text{общ.}}$ ,  $R_{\text{прост.}}$ ,  $R_{\text{сл.}}$ ,  $V_{\text{общ.}}$ ,  $V_{\text{алем.}}$  в Методике диагностирования определяются расчетным путем – по функциям, переменными в которых яв-

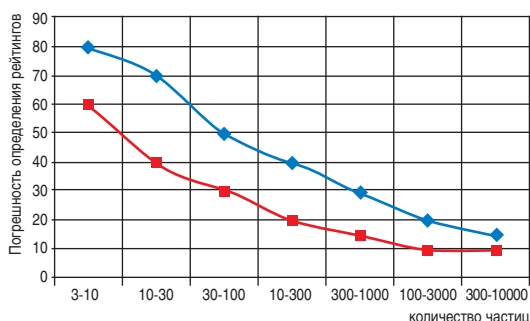


Рис. 4  
Функциональные зависимости  
погрешности определения рейтингов  
и показателей износа ( $1 - R_{\text{общ.}}$ ,  $R_{\text{пр.}}$ ,  
 $R_{\text{сл.}}$ ) и ( $2 - V_{\text{общ.}}$ ,  $V_{\text{алем.}}$ ) от количества  
частиц

ляются измеренные значения величин диагностических параметров. Полученные при этом значения рейтингов являются результатами косвенных измерений, а оценка суммарных погрешностей рейтингов методически выполняется с учетом частных производных функции определения конкретного рейтинга и погрешностей измерения входящих в функцию диагностических параметров. Графически показано (рис. 4), что функциональная зависимость погрешности определения рейтингов от гранулометрического состава (количества частиц) имеет характер регрессии.

В рамках проведения метрологической экспертизы Методики диагностирования выполнен анализ состояния метрологического обеспечения и обеспечения единства измерений, по результатам которого можно констатировать:

- эксплуатационная документация на сцинтилляционный анализатор САМ-ДТ-01-2 в основном соответствует требованиям национальных стандартов единой системы конструкторской документации ГОСТ Р 2.601-2019 и ГОСТ Р 2.610-2019;
- периодическое метрологическое обслуживание САМ-ДТ-01-2 осуществляется по Методике поверки, форма и структура которой соответствует РМГ 51-2002;
- программное обеспечение анализатора САМ-ДТ-01-2 прошло тестирование и метрологическую аттестацию в процессе утверждения типа средства измерений и в основном соответствует ГОСТ Р 8.654-2015;
- методики измерений, применяемые при измерении концентрации продуктов изнашивания в работающих маслах на анализаторе САМ-ДТ-01-2, соответ-



ствуют основным положениям национального стандарта ГОСТ Р 8.563-2009 и стандарта отрасли ОСТ 54-3-154.82-2002.

Реализованные мероприятия для устранения несоответствий, выявленных при метрологической экспертизе, позволяют снизить до приемлемого уровня метрологические риски [14, 15] негативных ситуаций при осуществлении авиационной деятельности в промышленности и воздушном транспорте.

Перспективным продолжением работ по методическому обеспечению трибодиагностики с применением сверхвысокочастотного плазменного комплекса на основе анализатора САМ-ДТ-01-2 является разработка Методики диагностирования двигателей семейства ПС-90А.

**МИ**

#### Список использованных источников

1. Титов В.И., Глазова И.С., Богоявленский А.А. Метрологическая аттестация приборов для определения концентрации железа в масле (ПОЖ-М) // Реф. сб. «Наука и техника ГА». Серия Надежность долговечность, ре-

#### С юбилеем!

Представленную в этом номере статью авторы посвящают юбилейной дате: 4 октября 1930 г. был основан Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации. ФГУП ГосНИИ ГА является ведущим отраслевым научно-исследовательским центром, играющим важную роль в функционировании и развитии воздушного транспорта, создании перспективной авиационной техники. Метрологическая служба института при этом успешно решает вопросы обеспечения единства измерений в специальных областях авиационной деятельности, в том числе направленные на снижение (исключение) возможностей возникновения метрологических рисков негативных ситуаций. Поздравления в адрес коллектива ФГУП ГосНИИ ГА с 90-летним юбилеем направлены от председателя Правительства РФ М. Мишустина, министра транспорта России Е. Дитриха, председателя коллегии Военно-промышленной комиссии Ю. Борисова и руководителя Росавиации А. Нерадько. Коллектив журнала «Мир измерений» присоединяется к поздравлениям.

# МЕТОДИКА ТРИБОДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ Д-30КУ/КП С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ ПЛАЗМЕННОГО КОМПЛЕКСА: РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ И АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ

сурс. Техническое обслуживание и ремонт. М.: Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, 1983. № 2. С. 30–33.

2. Богоявленский А.А., Юрскова Н.А., Теплов И.Е. Метрологическая аттестация квантометров МФС-3 и МФС-5 / Труды Государственного научно-исследовательского института гражданской авиации. М., 1985. Вып. 236. С. 116–118.

3. Богоявленский А.А. Оценка погрешности квантометров при диагностировании двигателей по продуктам изнашивания в масле / Труды Государственного научно-исследовательского института гражданской авиации. М., 1986. Вып. 248. С. 104–105.

4. Богоявленский А.А. Вопросы обеспечения единства измерений при межведомственных испытаниях спектрометров для трибодиагностики ГТД // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219 (9). С. 77–84.

5. Богоявленский А.А. Трибодиагностика при эксплуатации авиационных ГТД / Авиасоюз. – 2020. № 1 (79). С. 38–39.

6. Богоявленский А.А. Технологии изготовления и метрологической аттестации стандартных образцов концентрации продуктов изнашивания в работающих маслах / Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 199 (1). С. 134–139.

7. Богоявленский А.А., Боков А.Е. Об опыте проведения метрологической экспертизы технической документации на авиационную технику: критерии, методология, результаты // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 14 (325). С. 40–55.

8. РМГ 63–2003. Государственная система проведения метрологической экспертизы (ГСИ). Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации. М.: Стандартинформ, 2010. 17 с.

9. ОСТ 54–3–156.66–94. Отраслевая система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза нормативной и технической документации. Организация и порядок проведения. М.: ФГУП ГосНИИ ГА, 1994. 16 с.

10. ОСТ 1 00221–2005. Отраслевая система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза технических заданий, конструкторской и технологической документации. Организация и порядок проведения. М.: ФГУП НИИСУ, 2006. 12 с.

11. Федеральный закон от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

12. МИ 2639–2001. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массовой доли компонентов в веществах и материалах. ФГУП Уральский НИИ метрологии, Екатеринбург, 2001. 9 с.

13. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-9}$  до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм // Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.12.2018 г. № 2840. М.: 2018. 15 с.

14. Богоявленский А.А., Боков А.Е. Постановка задачи разработки методов управления метрологическими рисками негативных ситуаций в авиационной деятельности / Мир измерений. 2013. № 10. С. 3–7. DOI: 10.35400/1813-8667-2013-10-3-7.

15. Богоявленский А.А., Боков А.Е. Метрологическая экспертиза и анализ точности методики трибодиагностики двигателей Д-30КУ/КП с применением СВЧ плазменного комплекса // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 32. С. 41–53.

## References

1. Titov V.I., Glazova I.S., Bogoyavlenskiy A.A. Metrological attestation of devices for determining the concentration of iron in oil (POZH-M). Abstract coll.: Science and Technology of Civil Aviation. Series: Reliability, Durability, Resource. Maintenance and repair. Moscow, State Scientific Research Institute of Civil Aviation, 1983, No 2, pp. 30–33.

2. Bogoyavlenskiy A.A., Yurskova N.A., Teplov I.E. Metrological attestation of quantum meters MFS-3 and MFS-5. Proc. of the State Research Institute of Civil Aviation. Moscow, 1985, vol. 236, pp. 116–118.

3. Bogoyavlenskiy A.A. Estimation of the error of quantum meters when diagnosing engines by wear products in oil. Proc. of the State Research Institute of Civil Aviation. Moscow, 1986, vol. 248, pp. 104–105.

4. Bogoyavlenskiy A.A. Ensuring the uniformity of measurements in interdepartmental testing of spectrometers for tribodiagnostics of GTE. Scientific Bulletin of MGTU GA. 2015, No 219 (9), pp. 77–84.

5. Bogoyavlenskiy A.A. Tribodiagnostics in the operation of aviation gas turbine engines. Aviasoyuz, 2020, No 1 (79), pp. 38–39.

6. Bogoyavlenskiy A.A. Technologies of production and metrological attestation of reference materials of the concentration of wear products in working oils. Scientific Bulletin of MGTU GA, 2014, No 199 (1), pp. 134–139.

7. Bogoyavlenskiy A.A., Bokov A.E. On the experience of conducting metrological examination of technical documentation for aviation equipment: Criteria, methodology, results. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation, 2016, No 14 (325), pp. 40–55.

8. RMG 63–2003. State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). Ensuring the effectiveness of measurements in process control. Metrological examination of technical documentation. Moscow, Standartinform, 2010, 17 p.

9. OST 54–3–156.66–94. Industry-specific system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological examination of normative and technical documentation. Organization and procedure. Moscow, FGUP GosNII GA, 1994, 16 p.

10. OST 1 00221–2005. Industry-specific system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological examination of technical tasks, design and technological documentation. Organization and procedure. Moscow, FGUP NISU, 2006, 12 p.

11. Federal Law No102-FZ of 26.06.2008 “On ensuring the uniformity of measurements”.

12. MI 2639–2001. GSI. State verification scheme for measuring the mass fraction of components in substances and materials. Yekaterinburg, Ural Research Institute of Metrology, 2001, 9 p.

13. State verification scheme for measuring instruments of length in the range from  $1 \cdot 10^{-9}$  to 100 m and wavelengths in the range from 0.2 to 50 microns. Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No 2840 of 29.12.2018. Moscow, 2018, 15 p.

14. Bogoyavlenskiy A.A., Bokov A.E. Setting the task of developing methods for managing metrological risks of adverse situations in aviation activities. Measurements World, 2013, No 10, pp. 3–7. DOI: 10.35400/1813-8667-2013-10-3-7.

15. Bogoyavlenskiy A.A., Bokov A.E. Metrological examination and accuracy analysis of tribodiagnostics of the D-30KU/KP engines using a microwave plasma complex. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation, 2020, No 32, pp. 41–53.

## Abstract

The article contains the results of the metrological examination and research of the accuracy indicators of a method for diagnosing aircraft gas turbine engines of the D30KU/KP family using an ultra-high-frequency plasma complex. The results of metrological examination of a complete set of regulatory documents related to the diagnostic methodology, and an analysis of the state of metrological support are provided as well. During the metrological examination, the traceability of a measuring instrument (diagnostics) – an ultrahigh-frequency plasma complex – is evaluated based on the scintillation analyzer SAM-DT-01–2. To achieve that, local verification schemes from the state primary

standards of the corresponding types of measurements were built. The implementation of measures to eliminate inconsistencies identified during metrological examination allows to reduce to an acceptable level the metrological risks of adverse situations when carrying out aviation activities in industry and air transportation. In addition, the probability of occurrence of errors of the first and second kind in the technological processes of tribodiagnostics of aviation gas turbine engines is reduced when implementing a method that has passed metrological examination in real practice. At the same time, the error in determining ratings and wear indicators provides acceptable accuracy indicators and sufficient reliability in assessing the technical condition of friction units of the D-30KP/KP2/KU/KU-154 aircraft engines.