

УДК 629.7.083, 621.45.04

А. А. ЖУКОВА, кандидат технических наук, Е. А. ШАПОРОВА, кандидат химических наук, С. О. СТОЙКО, магистр технических наук, Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

МОНИТОРИНГ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА НАЛИЧИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В МАСЛЕ

Изучены актуальные вопросы внедрения новых систем эксплуатации по техническому состоянию и надежности в практику эксплуатации авиационных двигателей для обеспечения их высокой готовности, безопасности полетов при заданной надежности, больших ресурсах и низких эксплуатационных расходах. Однако реализация этих систем возможна только при наличии в эксплуатации эффективных инструментальных методов и средств технического диагностирования для оценки контроля, прогнозирования технического состояния авиационных двигателей. Мониторинг за состоянием масла и включенными в него примесями является немаловажным механизмом, обеспечивающим эффективность контроля и регулирования состояния двигателя.

Статистика авиационных происшествий свидетельствует о том, что их причиной чаще всего становятся нарушения работы двигателей. Такая ситуация может быть связана с неэффективностью диагностики работы топливной системы воздушного судна (далее – ВС). И это несмотря на то, что существуют и применяются в эксплуатации самые различные способы контроля технического состояния авиационной техники. Наиболее распространенными являются методы контроля с использованием видеоэндоскопов, по термогазодинамическим параметрам за камерой сгорания, по наличию вредных примесей в системе кондиционирования воздуха, по показателям качества масла и др. [1, 4].

Постановка задачи. В настоящее время всё в большей степени внедряется система эксплуатации авиационной техники по фактическому техническому состоянию. Это способствует своевременному обнаружению неисправностей и повышает экономическую эффективность технического обслуживания (ТО) и ремонта. Тем не менее до сих пор до конца не решенным остается вопрос о надежности и корректности данных, получаемых различными методами контроля состояния узлов и агрегатов ВС, что тормозит распространение систем ТО по состоянию на эксплуатацию систем и агрегатов авиадвигателя. По оценкам специалистов инструментальные методы диагностики, используемые в настоящее время для обнаружения дефектов на ранней стадии развития, чаще всего не дают возможности надежного прогнозирования дальнейшего функционирования двигателя [1]. Одним из наиболее перспективных и надежных направлений оценки состояния маслосистемы двигателя нам представляется трибодиагностика, основанная на комплексном подходе [3, 4].

Основная часть. Анализ металлов в смазочных материалах (SOAP – программа спектрометрического анализа нефти и нефтепродуктов; JOAP – программа анализа реактивного масла) по изменению характеристик масла позволяет делать заключение о качестве рабочего масла, стабильности присадок, износе узлов трения [9]. Большинство производителей двигателей предпочитают, чтобы интерпретация анализа металлов проводилась на основе отклонений от «установленных тенденций», а не относительно «пороговых или контрольных пределов», поскольку именно в первом случае имеется возможность своевременного обнаружения развивающихся дефектов. В каждом типе двигателя используются разные марки металлов, поэтому характер износа

будет различным и в некотором смысле уникальным. Эти формы износа будут специфичными для каждого типа двигателя, вне зависимости от марки масла. В то же время известно, что некоторые масла лучше/хуже контролируют износ [8]. В соответствии с концепцией SOAP идентификация и количественная оценка тенденции износа узлов трения в двигателях по наличию и содержанию металлов в маслах позволяет определить и своевременно изолировать конкретные проблемы с внутренними узлами двигателя.

Немалую роль в диагностике состояния масла будут играть непосредственно его физико-механические параметры, такие как:

- вязкость, изучение которой позволяет определить, как изменяется способность сохранять смазывающую способность в зависимости от температурных условий для работающего авиационного масла;

- температура вспышки, определение которой позволяет контролировать загрязнение масел легкими фракциями, снижающими пожаробезопасность и технические характеристики;

- механические примеси, по концентрации которых в масле можно установить степень износа узлов двигателя; особое внимание уделяется примесям (наличие, содержание и форма частиц) железа, меди, алюминия, свинца, хрома, олова и никеля;

- реакция водной вытяжки, которая используется для определения наличия таких примесей, как кислоты и щелочи, – их наличие свидетельствует о загрязнении масла и приводит к снижению коррозионной стойкости контактирующих металлов;

- кислотное число, показывающее деградацию комплекса присадок-антиоксидантов, присутствующих в масле, и указывает на необходимость его замены.

Изменение этих параметров обычно говорит о воздействии на масло высоких температур в масляной системе двигателя, что приводит к его термическому или окислительному гидролизу. Металлические примеси обуславливают износ узлов трения.

Непосредственно окисление будет протекать по следующему механизму: масло, контактируя с воздухом, особенно при высокой температуре, разлагается с образованием органических кислот. Этот процесс в определенной степени предотвращается за счет наличия в масле присадок-антиоксидантов, молекулы которых взаимодействуют с активными радикалами, снижая их количество, тем самым замедляя процесс окисления базовых

компонентов масла. После того, как антиоксиданты израсходованы, начнут окисляться углеводороды масла, что приведет к ухудшению смазывающих свойств и усилению трения в подшипниках, редукторах и других аналогичных узлах. По результатам измерения общего кислотного числа масла, можно оценить, израсходован ли антиоксидант и имеет ли место значительное ухудшение качества масла в процессе эксплуатации. На основании этих данных можно сделать вывод относительно правильности выбора масла, подвергалось ли оно чрезмерной термической нагрузке при работе, то может даже являться признаком необходимости изменения периода замены масла.

Разрушение молекул масла при температурном воздействии сопровождается образованием нерастворимых соединений, которые в дальнейшем становятся загрязнителями системы. Термодеструкция чаще всего становится следствием эффекта кавитации или электростатического разряда искры при внутреннем молекулярном трении, создающем высоковольтный электрический заряд. Образовавшиеся твердые загрязнения могут выступать абразивными частицами, еще в большей степени усиливающими трение, что приводит к повышению износа материалов в узлах трения.

Вода в масле считается потенциальным загрязнителем. В маслах для реактивных двигателей на основе сложных эфиров большое количество воды в сочетании с теплом может вызвать гидролиз, что приведет к увеличению кислотного числа. Вода может попасть в масляную систему реактивного двигателя как случайное загрязнение, так и в результате конденсации, поскольку сложные эфиры гигроскопичны и способны поглощать воду из воздуха. Основное беспокойство при этом вызывает возможность коррозии из-за образования органических кислот.

Предельные значения параметров качества масел, используемые большинством производителей двигателей, показаны в таблице 1. Периодический контроль этих параметров должен указывать на развитие проблемы в масляной системе двигателя до того, как будет достигнута хотя бы одна из приведенных величин [7].

Таблица 1 – Основные параметры масла и их пределы

Параметры масла	Пределы
Вязкость	+25 ... -10 %
Кислотное число	+2,0 мг КОН/г
Содержание воды	1000 ppm

Мониторинг металлов помогает выявить медленно прогрессирующие повреждения подшипников и лабиринтных уплотнений опор роторов, деталей коробки приводов и центрального привода, включенных в маселосистему авиационного двигателя.

При анализе результатов износа важно учесть, какие металлы используются в конструкции двигателя, как происходит износ узлов трения в зависимости от времени наработки двигателя. Увеличенное содержание железа, титана и хрома в масляной системе обычно приводит к образованию крупных металлических частиц, которые нелегко проконтролировать с помощью спектрометрического анализа масла, но может быть проанализировано другими способами, такими как феррография и анализ металлических примесей с помощью детекторов магнитного чипа.

На рисунке 1 приведены результаты измерений концентрации химических элементов загрязнения проб масла Mobil Jet Oil, отобранного с турбовинтового двигателя Д-436-148 самолета АН-148 [2]. В начальный период (до 3000 часов наработки) в масле имеется только незначительное количество (не более 0,1 г/т) частиц железа. Это соответствует удовлетворительному состоянию двигателя. Затем наблюдается постепенное увеличение содержания частиц Fe (до 0,7 г/т) и появление некоторого количества частиц хрома, что свидетельствует о начальной приработке двигателя и относительно небольшом значении величин износа его узлов. Далее в масле появляется незначительное количество частиц меди, никеля, титана и цинка, количество железосодержащих частиц снижается, что указывает на незначительный износ в процессе эксплуатации.

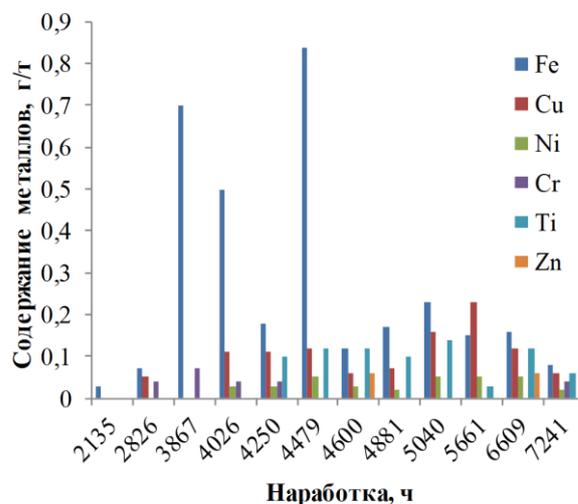


Рисунок 1 – Изменение содержания частиц металлов в работающем масле

Наличие кремния может указывать на загрязнение пробы масла или попадание грязи/пыли во впускную систему двигателя. Другой причиной может быть чрезмерное использование силиконовых герметиков для уплотнения некоторых частей двигателя/коробки передач. Высокий уровень этого типа Si может привести к вспениванию масла и возможной потере смазочных свойств и способности теплопередачи.

Фосфор входит в состав противоизносных присадок [8, 10], поэтому его содержание в масле может уменьшаться при нормальном функционировании силовой установки. Однако значительное снижение его концентрации более чем на 50 % в первые 100 часов работы может указывать на значительное трение металлов движущихся элементов узлов трения, что может быть ранним признаком аномального отказа подшипника или шестерни. Важно определить уровень фосфора в новом масле и контролировать изменение его значения. Иногда увеличение измеренного содержания фосфора может указывать на загрязнение другим фосфорсодержащим маслом (например, гидравлической жидкостью на основе сложного эфира фосфорной кислоты), что также может привести к пагубным последствиям и снижению устойчивости к окислению работающего масла.

Повышенное содержание алюминия обычно связано с повреждением торцевых крышек поршневых пальцев

и часто является признаком того, что двигатель не прогревается должным образом перед взлетом [2].

Проведенный анализ свидетельствует о перспективности использования трибологических данных для диагностики технического состояния авиационных двигателей.

Тем не менее проводимый в авиационных организациях мониторинг параметров качества масла редко является эффективным: не более 5 % от всех неисправностей двигателя удастся определить по трибологическим данным [2]. Это связано в основном с тем, что используемое оборудование и методики устарели и не отвечают современным требованиям, в результате регистрируемые данные не иллюстрируют реальные процессы.

Кроме того, важную роль играет место отбора проб. Контроль масла из маслобака не всегда является эффективным, поскольку значительная часть загрязнений оседает на фильтре. Поэтому отбор проб целесообразно осуществлять до фильтра или анализировать смывки фильтров [5]. Применение современного оборудования, позволяющего получать точные данные, и отбор проб масла из смывок фильтров маслосистемы позволит использовать результаты мониторинга работающего масла для разработки прогнозных моделей работоспособности авиационных двигателей.

Математическое моделирование позволяет выявлять характерные особенности функционирования узлов и агрегатов на основе глубокого теоретического анализа эксплуатируемых двигателей [6]. Разработка математической модели работы двигателя на основе эксплуатационных данных о состоянии масла обеспечит контроль развития дефектов, позволит оценивать и прогнозировать работоспособность авиационного двигателя, осуществлять необходимое техническое обслуживание по фактическому состоянию двигателя и своевременную замену масла при ухудшении его параметров, не связанных с износом.

Заключение. В настоящей работе проведен анализ данных по диагностике авиадвигателя, показано, что одним из перспективных подходов к мониторингу технического состояния двигателя является комплексная оценка на основе трибодиагностики. Построение прог-

нозных моделей, основывающихся на экспериментальных данных, корректно описывающих работу двигателя, позволит перейти на обслуживание авиационной техники по ее фактическому состоянию.

Список литературы

- 1 **Менчиков, Р. В.** Методы технического диагностирования авиационных двигателей / Р. В. Менчиков, Е. С. Панкеев, А. А. Парпуц // Решетневские чтения. – 2018. – С. 413–414.
- 2 **Грядун, К. И.** Диагностирование авиационных двигателей по содержанию металлов в масле / К. И. Грядун [и др.] // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2019. – Т. 22. – № 3. – С. 35–44.
- 3 **Машошин, О. Ф.** Диагностика авиационного газотурбинного двигателя по наличию вредных примесей в системе кондиционирования воздуха / О. Ф. Машошин, Г. С. Зонтов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 205. – С. 44–48.
- 4 **Шапорова, Е. А.** Техническая диагностика авиационных двигателей / Е. А. Шапорова, С. О. Стойко // Авиация: история, современность, перспективы развития: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22 октября 2020 г. / под науч. ред. А. А. Шегидевича. – Минск : БГАА, 2020.
- 5 **Дроков, В. Г.** Оценка технического состояния маслосистемы авиационных газотурбинных двигателей с помощью трибодиагностических методов / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, Ф. И. Мухутдинов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84. – № 1(1). – С. 36–46.
- 6 **Богуслаев, А. В.** Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделий в авиадвигателестроении / А. В. Богуслаев, Е. И. Дубровин, И. А. Набока // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2004. – № 1. – С. 136–145.
- 7 **Van Rensselar, J.** Oil analysis past and future / J. Van Rensselar // Tribology & Lubrication Technology. – 2018. – No. 74. – P. 48–53.
- 8 **Luiz, J. F.** Tribofilm Formation, Friction and Wear-Reducing Properties of Some Phosphorus-Containing Antiwear Additives / J. F. Luiz, H. Spikes // Tribol. Lett. – 2020. – No. 68. – P. 75–78.
- 9 **Dellis, P. S.** The Automated Spectrometric Oil Analysis Decision Taking Procedure as a Tool to Prevent Aircraft Engine Failures / P. S. Dellis // Tribology in Industry. – 2019. – No. 41. – P. 292–309.
- 10 **Elemental analysis of jet engine lubrication oil and jet fuel using in-air PIXE / S. Katsumi [et al.] // International Journal of PIXE. – 2018. – No. 28. – P. 85–92.**

Получено 03.03.2021

A. A. Zhukova, E. A. Shapорова, S. O. Stoiko. Aircraft engine monitoring for metal impurities in oil.

The topical issues of introducing new operating systems for technical condition and reliability into the practice of operating aircraft engines to ensure their high availability, flight safety at a given reliability, large resources and low operating costs were studied. However, the implementation of these systems is possible only if there are effective instrumental methods and means of technical diagnostics in operation for assessing control and predicting the technical state of aircraft engines. Monitoring the condition of the oil and the impurities included in it is an important mechanism in the process of monitoring and regulating the condition of the engine.