

УДК 629.7.064

## КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ЗНАЧЕНИЙ ВЯЗКОСТИ И УРОВНЯ ЧИСТОТЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

© 2012 М. А. Ковалёв, Г. В. Бородкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Предложена диагностическая система для контроля технического состояния гидравлических систем летательных аппаратов в наземных условиях. В качестве диагностических признаков использованы значения дисперсного состава частиц загрязнения и вязкости рабочей жидкости. Разработаны математическая модель изменения технического состояния гидросистемы и алгоритм его диагностирования.

*Надёжность гидравлических систем, система функциональной диагностики гидравлических систем, контроль значений вязкости и чистоты рабочей жидкости гидравлических систем, алгоритм диагностирования технического состояния гидравлических систем.*

Известно, что существенная часть отказов оборудования летательных аппаратов (ЛА) приходится на элементы гидравлических систем (ГС), что обусловлено сложными условиями их работы [1]. Отказ одной или нескольких функциональных подсистем ГС ЛА может спровоцировать аварию или катастрофу. В связи с этим повышение надёжности ГС ЛА является актуальной научно-технической задачей.

Надёжность и долговечность агрегатов ГС находится в непосредственной зависимости от чистоты рабочей жидкости (РЖ) [1,2]. Загрязняющие вещества, содержащиеся в жидкости, попадают в зазоры между рабочими поверхностями скользящих пар гидроагрегатов и заклинивают их или оказывают абразивное действие, а также закупоривают различные жиклёрные и дроссельные каналы. Кроме того, мелкие частицы, попадая в РЖ ГС, способствуют разрыву масляной плёнки, ухудшают режим смазки и вызывают повышенное окисление жидкости.

Параметры частиц загрязнения РЖ являются одними из наиболее важных диагностических параметров при контроле технического состояния узлов ГС [3,4]. Исследования в области контроля технического состояния ГС показали, что даже в РЖ наиболее совершенных механизмов, какими являются изделия авиационной и космической техники,

практически всегда содержится множество различных по химическому составу и твердости частиц. Появление этих частиц свидетельствует о наличии процесса разрушения какого-либо узла ГС, что в конечном итоге может привести к её отказу. Контролируя параметры этих частиц, можно прогнозировать отказы ГС. Кроме того, повышенный уровень загрязнённости РЖ вызывает повышенный износ деталей гидропривода, ухудшение его эксплуатационных характеристик и преждевременный выход из строя.

В настоящее время разработана диагностическая система, которая позволяет прогнозировать состояние и остаточный ресурс как отдельных гидроагрегатов, так и всей ГС в целом [2]. В этой системе оценивается дисперсный состав частиц загрязнителей РЖ.

Однако на работоспособность ГС огромное влияние оказывает также значение вязкости РЖ. Так, для обеспечения требуемого уровня смазывающей способности, позволяющего агрегатам ГС функционировать в нормальном режиме, значение вязкости РЖ не должно быть ниже установленного техническими требованиями уровня. При этом известно [5], что вязкость большинства минеральных масел при длительной работе в условиях высоких давлений, в особенности при дросселировании жидкости с большим

перепадом давления и при смазке под давлением трущихся пар с высокой удельной нагрузкой, может значительно понизиться (примерно до 50% первоначального значения).

Поэтому, расширить диагностические способности известной системы контроля [2] можно, если включить в её состав устройство, позволяющее измерять значение вязкости.

В настоящее время в процессе эксплуатации ЛА для контроля значения вязкости РЖ используется метод отобранных проб, для которого характерен ряд существенных недостатков [2].

Для поддержания значения вязкости в требуемых пределах в процессе эксплуатации отечественных ЛА предусмотрена периодическая замена РЖ (полная или частичная). Такая замена обычно приурочивается к тяжёлой форме регламента или производится во время ремонта самолёта после отработки межремонтного ресурса (или ресурса до первого ремонта).

Существуют различные методы измерения вязкости жидкости [6]: капиллярный, вибрационный, ротационный, метод падающего шарика. Анализ [6,7] этих методов показал, что для измерения вязкости РЖ в разрабатываемой диагностической системе целесообразно использовать капиллярный вискозиметр ПКВ-901 (в дальнейшем ПКВ), разработанный в ОНИЛ – 16 СГАУ.

Прибор контроля вязкости типа ПКВ предназначен для автоматического контроля значения кинематического коэффициента вязкости РЖ жидкостных систем при температуре 50°C без отбора пробы жидкости из гидравлического оборудования, в том числе при контроле токсичных жидкостей. Основными достоинствами этого прибора являются возможность измерения вязкости непосредственно в потоке жидкости в режиме реального времени (нет необходимости прибегать к отбору проб), а также его высокая точность (относительная погрешность измерений составляет доли процента).

На рис. 1 представлена система функциональной диагностики ГС ЛА на базе подвижной гидравлической установки (ПГУ) с вискозиметром ПКВ в её составе. В этой системе оценивается дисперсный состав частиц загрязнения, вносимых в жидкость функциональными подсистемами ГС, и вязкость РЖ. ПГУ предназначена для периодического наземного обслуживания ГС ЛА. Эта установка представляет собой совокупность различных агрегатов и узлов, смонтированных в специальном кузове, установленном на автомобильном прицепе ТАПЗ-755. Установка имеет две ГС, снабженные насосами, регуляторами давления и расхода, контрольно-измерительными приборами, воздушной системой для поддавливания гидробаков.

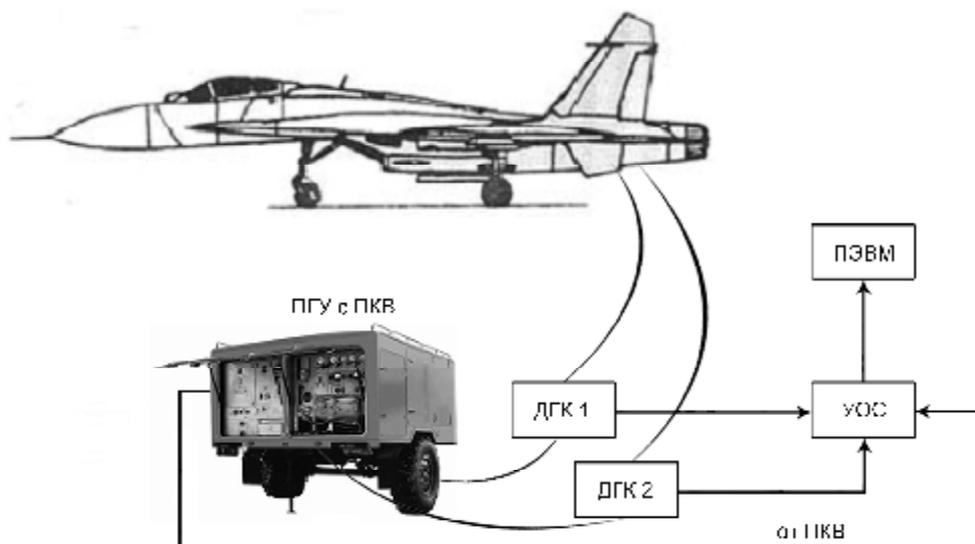


Рис. 1. Система функциональной диагностики ГС ЛА на базе ПГУ с вискозиметром ПКВ

Во время наземного обслуживания ГС ЛА при помощи диагностической системы периодически определяются значения дисперсного состава частиц загрязнения РЖ и её вязкости. Таким образом, по результатам нескольких измерений можно контролировать динамику изменения этих параметров. Для контроля дисперсного состава частиц загрязнения используется фотоэлектрический датчик встроенного контроля (ДВК) [8]. По разности показаний двух ДВК, установленных на входе и на выходе ПГУ, можно определить уровень загрязнений, вносимых в РЖ ПГУ или отдельными агрегатами ГС ЛА.

Предложенная система работает следующим образом: сигналы ДВК и ПКВ поступают в устройство обработки сигналов (УОС), где они преобразуются в форму, удобную для их дальнейшей обработки, регистрации и индикации. Преобразованные и оцифрованные сигналы подаются в ПЭВМ, которая реализует алгоритм диагностирования, рассмотренный ниже. Более детально состав устройства обработки сигналов и назначение его элементов рассмотрены в работе [9].

При построении системы функциональной диагностики ГС ЛА необходимо учитывать требования относительно условий ее функционирования. Согласно требованиям эксплуатирующих организаций температура контролируемой жидкости может достигать значения  $100^{\circ}\text{C}$ . Однако фотоэлектрические ДВК могут эксплуатироваться при температуре жидкости не превышающей  $70^{\circ}\text{C}$ . Поэтому установка таких датчиков непосредственно в основную магистраль ГС невозможна. Для контроля параметров рабочей жидкости ДВК предлагается установить в дополнительный гидравлический контур (ДГК)

с малым расходом жидкости. Структурная схема подобного контура [2] изображена на рис. 2.

Контур состоит из вентиля (В), двух настраиваемых дросселей (НД), теплообменника (ТО), в качестве которого можно применить радиатор или микрохолодильник с элементами Пельтье, ДВК и обратного клапана (ОК). Вентиль необходим для перекрытия гидравлического контура при снятии ДВК в целях его поверки или замены. НД необходим для снижения расхода жидкости до заданной величины. ТО предназначен для охлаждения жидкости до значения, не превышающего  $70^{\circ}\text{C}$ . Второй дроссель необходим для повышения давления РЖ в месте установки ДВК, что препятствует образованию пузырьков воздуха в анализируемой жидкости. Проанализированная жидкость поступает через ОК в линию слива (ЛС) или в гидробак.

Установка датчиков контроля параметров РЖ на находящиеся в эксплуатации ЛА требует выполнения сложных доработок ГС, на проведение которых необходимо решение на уровне генерального конструктора ЛА. Поэтому вопрос применения бортового варианта системы контроля ГС целесообразно рассматривать лишь при разработке новых образцов авиационной техники.

Для разработки алгоритма диагностирования представленной диагностической системы были использованы обобщённые уравнения [10]. В случае контроля значений двух параметров - дисперсного состава частиц загрязнения  $N(t, d)$  и вязкости  $\eta(t)$  (где  $t$  - время, а  $d$  - диаметр частиц) модель изменения технического состояния ГС ЛА будет иметь следующий вид:

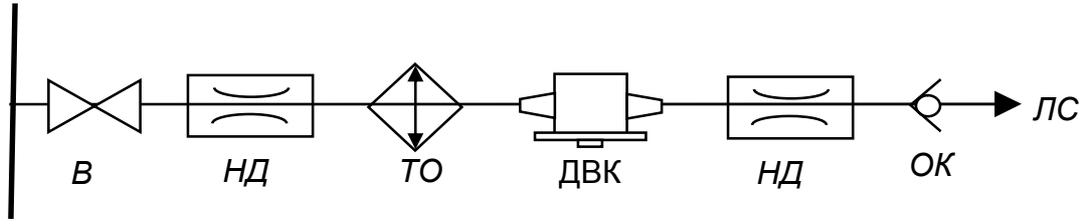


Рис.2. Структурная схема дополнительного гидравлического контура для установки ДВК

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{il}(t + \Delta t, d) = N_{il}(t, d) + \frac{dN_{il}(t, d)}{dt} \Delta t; \\ \Delta N_l(t + \Delta t, d) = \Delta N_l(t, d) + \frac{d(\Delta N_l(t, d))}{dt} \Delta t; \\ n_l(t + \Delta t) = n_l(t) + \frac{dn_l(t)}{dt} \Delta t, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $l=1, \dots, L$  – номер отдельной ГС в составе ГС ЛА;  $L$  – количество отдельных ГС в составе ГС ЛА;  $i$  – номер точки контроля значений  $N(t, d)$  в отдельной ГС (при построении алгоритма (1) было принято, что в каждой отдельной ГС должны быть две точки контроля, то есть  $i=1, 2$ ; тогда по разности показаний датчиков можно оценить дисперсный состав частиц загрязнения, вносимых в РЖ какими-либо агрегатами ГС);  $\Delta t$  – интервал времени между измерением значений параметров  $N(t, d)$  и  $v(t)$ ;

$$\Delta N_l(t, d) = N_{1l}(t, d) - N_{2l}(t, d).$$

Система уравнений (1) позволяет прогнозировать значения дисперсного состава частиц загрязнения РЖ и её вязкости на интервале времени  $\Delta t$ . Для вывода уравнений использовался математический аппарат рядов Фурье.

На основе системы уравнений (1) можно построить модель принятия решения о техническом состоянии ГС:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{il}(t, d) < N_{il}(d)_{np}; \\ \Delta N_l(t, d) < \Delta N_l(d)_{np}; \\ \frac{dN_{il}(t, d)}{dt} < N_{il}'(d)_{np}; \\ \frac{d(\Delta N_l(t, d))}{dt} < \Delta N_l'(d)_{np}; \\ v_l(t) \geq v_{l_{np}}; \\ \frac{dv_l(t)}{dt} \geq v'_{l_{np}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь  $N_{il}(d)_{np}$ ,  $N_{il}'(d)_{np}$  и  $v_{l_{np}}$ ,  $v'_{l_{np}}$  – предельно допустимые значения параметров

$N_{il}(t, d)$ ,  $v_l(t)$ , а также скоростей их изменения;  $\Delta N_l(d)_{np}$ ,  $\Delta N_l'(d)_{np}$  – аналогичные величины для параметра  $\Delta N$ . Допуски определяются на основе значений, рассчитанных при помощи диагностических моделей ГС ЛА или определённых при помощи специальных испытательных процедур, методика построения и проведения которых описана в ряде работ, например [11].

Система уравнений (2) является алгоритмом диагностирования ГС ЛА. Ее можно назвать моделью контроля стабильности в работе ГС. Техническое состояние ГС стабильно, т.е. она работоспособна, если выполняются все условия, составляющие систему уравнений (2).

Таким образом, алгоритм определения технического состояния ГС ЛА на основе мониторинга двух параметров: дисперсного состава частиц загрязнения и уровня вязкости РЖ, приведённый в данной статье, позволяет принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации ГС ЛА, а также необходимости выполнения каких-либо ремонтных работ. Применение данной диагностической системы на аэродромах и при испытаниях агрегатов и узлов ГС ЛА позволит перейти к техническому обслуживанию по состоянию, что существенно снизит затраты на эксплуатацию и уменьшит число отказов агрегатов и узлов ГС ЛА.

Следует отметить, что количество контролируемых параметров РЖ ГС может быть увеличено. Это позволит расширить диагностические возможности системы контроля технического состояния ГС ЛА. Количество и наименование анализируемых величин определяются исходя из возможностей исследователей по наблюдению их значений и

задач, решаемых при диагностировании конкретной ГС.

#### Библиографический список

1. Тимиркеев, Р. Г. Промышленная чистота и тонкая фильтрация жидкостей летательных аппаратов [Текст] / Р. Г. Тимиркеев, В. М. Сапожников. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с.
2. Ковалев, М. А. Встроенная система контроля уровня загрязнения рабочей жидкости гидросистем воздушных судов [Текст] / М. А. Ковалев, Л. М. Логвинов, И. И. Хабло // *Авиационная промышленность*. - М.: НИАТ. - 2009. - №1. - С.51-56.
3. Ковалев, М. А. Упреждающее обслуживание гидросистем воздушных судов [Текст] / М. А. Ковалев // *Полет*. – М.: Машиностроение. - 2009. - № 5. - С. 38–42.
4. Ковалев, М. А. Упреждающее обслуживание гидросистем на основе анализа параметров частиц загрязнения рабочей жидкости [Текст] / М. А. Ковалев // *Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та*. - 2009. - № 3 (19). - Ч.1. - С. 89-96.
5. Черненко, Ж. С. Гидравлические системы транспортных самолетов [Текст] / Ж. С. Черненко [и др.]. – М.: Транспорт, 1975. – 184 с.
6. Профос, П. Измерения в промышленности. Способы измерения и аппаратура. Книга №2 (Измерения в промышленности: Справ., изд. в 3-х кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем.) [Текст] / Под ред. П. Профоса. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1990.
7. Малкин, А. Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения [Текст] / А. Я. Малкин, А. Е. Чалых. - М.: Химия, 1979. - 304 с.
8. Логвинов, Л. М. Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости [Текст] / Л. М. Логвинов. – М.: ЦНТИ «Поиск», 1992. – 91 с.
9. Ковалев, М. А. Микропроцессорное устройство для систем аппроксимативного анализа параметров рабочей жидкости гидросистем / М. А. Ковалев, Л. М. Логвинов, // *Ремонт, восстановление, модернизация*. - М.: Наука и технологии. - 2007. - № 4. - С. 43–46.
10. Ковалёв, М. А. Математическое обеспечение метода контроля технического состояния гидросистем воздушных судов по параметрам рабочей жидкости [Текст] / М. А. Ковалёв // *Известия СНЦ РАН*. – Самара: СНЦ РАН. - 2008. - Том 10. - №3 (25). - С. 858-864.
11. Fitch, E. C. Fluid contamination control [Текст] / E.C. Fitch // *Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC*. 1988. – 433 p.

### CONTROL OF THE AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEM TECHNICAL CONDITIONS ON THE BASIS OF MONITORING VISCIDITY VALUES AND PURITY LEVEL OF FLUID POWER

© 2012 M. M. Kovalev, G. V. Borodkin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

They offered the diagnostic system for the technical control condition of the aircraft hydraulic systems on the surface area. The values of dispersible particle composition of contamination and viscosity of fluid power are used as diagnostics signs. The mathematics model of the hydraulic system technical condition change and its diagnostics algorithm are worked out.

*The hydraulic systems reliability, functional diagnostics of the hydraulic systems, the viscosity values and fluid power control of purity level the hydraulic systems, hydraulic systems technical conditions diagnostic algorithm.*

**Информация об авторах**

**Ковалёв Михаил Анатольевич**, проректор по общим вопросам, доктор технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kovalev@ssau.ru](mailto:kovalev@ssau.ru). Область научных интересов: системы функциональной диагностики технического состояния жидкостных систем авиационной техники, функциональная диагностика гидравлических систем по параметрам частиц износа, контроль уровня загрязнения жидкостей при помощи датчиков встроенного контроля.

**Бородкин Глеб Владимирович**, аспирант военной кафедры, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [gleb-borodkin1985@yandex.ru](mailto:gleb-borodkin1985@yandex.ru). Область научных интересов: системы функциональной диагностики технического состояния жидкостных систем авиационной техники, функциональная диагностика гидравлических систем по параметрам частиц износа, контроль уровня загрязнения жидкостей при помощи датчиков встроенного контроля.

**Kovalev Mikhail Anatolyevich**, Vice President for General Affairs, doctor of technical sciences, associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kovalev@ssau.ru](mailto:kovalev@ssau.ru). Area of scientific: functional diagnosis of the technical state of aircraft fluid systems, functional diagnostics hydraulic parameters for the wear, contamination control fluids by sensors embedded control.

**Borodkin Gleb Vladimirovich**, post-graduate student of the military department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [gleb-borodkin1985@yandex.ru](mailto:gleb-borodkin1985@yandex.ru). Area of scientific: functional diagnosis of the technical state of aircraft fluid systems, functional diagnostics hydraulic parameters for the wear, contamination control fluids by sensors embedded control.