

УДК 629.7.083

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРЕЖДАЮЩЕГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

© 2015 А.М. Гареев, И.А. Попельнюк, Ю.П. Злобина

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

Поступила в редакцию 19.11.2015

Статья посвящена разработке метода, позволяющего реализовать упреждающее обслуживание гидравлических приводов летательных аппаратов на основе осуществления встроенного контроля чистоты рабочей жидкости гидравлической системы. Выявлен слабый элемент гидропривода, состояние которого определяет состояние агрегата в целом. Исследовано влияние частиц загрязнения на этот элемент. Разработаны схема и алгоритм принятия решения для оценки технического состояния гидропривода.

Ключевые слова: механические примеси, рабочая жидкость, упреждающее обслуживание, гидравлический привод, встроенный контроль, чистота рабочей жидкости.

В настоящее время наиболее перспективным, но в то же время малоисследованным направлением совершенствования системы технического обслуживания летательных аппаратов (ЛА) является обслуживание, направленное на упреждение отказов. Такой подход позволяет значительно сократить временные и ресурсные затраты на эксплуатацию ЛА, тем самым повысив экономический эффект от его использования. Для реализации упреждающего обслуживания необходимо достоверное знание о текущем техническом состоянии объекта и о его прогнозе на будущее.

Упреждающий подход особенно актуален для технического обслуживания гидравлической системы (ГС) ЛА, т.к. она относится к классу жизненно-важных систем, и любые отказы и неисправности, возникшие в ней во время полета, могут привести к катастрофическим последствиям. Одним из важнейших условий для обеспечения стабильной безотказной работы агрегатов ГС является поддержание чистоты рабочей жидкости (РЖ) на требуемом уровне.

Загрязнения попадают в систему различными путями [1]:

1) *С рабочими жидкостями.* В новой РЖ содержится некоторое количество частиц загрязнения, число которых увеличивается в процессе хранения и транспортировке, особенно в случае нарушения правил выполнения этих действий.

Гареев Альберт Минеасхатович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники. E-mail: gareevalbert@mail.ru

Попельнюк Илья Александрович, аспирант кафедры эксплуатации авиационной техники.

E-mail: osni204@yandex.ru

Злобина Юлия Петровна, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: yulya_zlobina11@mail.ru

2) *Атмосферные загрязнения.* Пыль и вода может попасть в ГС через дренажные каналы, а также в случае нарушений правил закрытой заправки РЖ в ГС.

3) *загрязнения во время технического обслуживания и ремонта.* Из-за постоянного использования и тяжелых условий работы узлов и агрегатов (высокие давления, температуры и нагрузки) гидравлические системы постоянно нуждаются в техническом обслуживании и ремонте. В процессе этих операций узлы и агрегаты гидравлической системы взаимодействуют с «загрязненной» окружающей средой. Кроме того, в случае замены какого-либо компонента системы (например, трубопровода) на его поверхности может содержаться некоторое количество загрязнений.

4) *Изнашивание деталей системы.* В процессе эксплуатации происходит непрерывный износ поверхностей агрегатов ГС (насосов, золотниковых пар). Вследствие этого происходит генерация загрязнений в ГС.

На сегодняшний день разработано множество способов для борьбы с загрязнениями, но достичь абсолютной чистоты РЖ в настоящее время не удается [2]. Даже до начала эксплуатации РЖ (при разливе, транспортировке и заправке) в ней содержится небольшое количество механических примесей, которое непрерывно растёт в процессе эксплуатации [3]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что концентрация загрязнений в РЖ это ценная диагностическая информация, позволяющая дать заключение не только о её состоянии, но и о состоянии агрегатов механической части системы.

Например, для оценки технического состояния агрегатов масляной системы летательных аппаратов и газотурбинных используют спек-

тральный анализ, основанный на отборе пробы масла и проведении анализа частиц загрязнений, содержащихся в ней, по результатам которого возможно определить их природу. Зная о материалах, из которых изготовлен тот или иной агрегат системы, на основе информации о природе загрязнений можно сделать вывод о том, какой именно агрегат подвержен интенсивному износу. Такая методика хорошо работает для масляных систем из-за того, что загрязнения в масле в основном имеют металлическую природу (продукты износа пар трения, подшипников), для которых линии спектра четко определены. Загрязнения в ГС системах зачастую представляют собой неметаллические или даже органические вещества, для которых проведение спектрального анализа весьма затруднительно, а значит использовать подобную методику для оперативной оценки чистоты РЖ и состояния агрегатов ГС нецелесообразно.

Для реализации упреждающего обслуживания ГС необходим метод, позволяющий быстро и достоверно оценить состояние того или иного агрегата. В качестве примера в данной статье рассмотрен гидравлический привод, являющийся одним из наиболее ответственных агрегатов ГС ЛА, крайне чувствительный к чистоте РЖ.

Гидравлический привод применяется как исполнительный механизм на ЛА там, где управление нагрузкой требует больших усилий, плавности движения и быстродействия [4]. Любой гидропривод можно представить в виде входного и исполнительного звена. Основным элементом входного звена является золотниковая пара, обеспечивающая подачу РЖ в исполнительное звено, в соответствии с управляющим воздействием пилота на штурвал. Золотниковая пара из-за микронных зазоров между золотником и гильзой наиболее подвержена влиянию механических примесей и по статистике является самым отказывающим элементом гидропривода. На основании этого можно говорить о том, что состояние золотниковой пары во многом определяет состояние всего агрегата в целом.

Рассмотрим влияние частиц загрязнения на работу золотниковой пары типового гидравлического привода.

Одним из основных параметров золотниковой пары, определяющих её качество, является трение при движении и при страгивании золотника с места. В работе [5] подробно рассмотрен вопрос зависимости силы трения в золотниковых парах от различных факторов. При нарушении цилиндричности пары и при наличии начального эксцентриситета осей золотника и гильзы появляется радиальная неуравновешенная сила, стремящаяся сместить золотник к гильзе, тем самым вызывая недопустимое увеличение сил трения в паре и в итоге заедание золотника в гильзе.

Величина неуравновешенной радиальной силы рассчитывается по формуле:

$$f_{rad} = \frac{\pi lrh\Delta p}{2e} \left(1 - \frac{2s+h}{\sqrt{(2s+h)^2 - 4e^2}}\right), \quad (1)$$

где f_{rad} – неуравновешенная радиальная сила; l – длина пояска золотника; r – радиус золотника; Δp – перепад давления на пояске золотника; e – эксцентриситет; h – конусность; s – величина зазора между золотником и гильзой со стороны основания конуса.

Конусность h в золотниковой паре образуется вследствие деформации поверхностей золотниковой пары частичками загрязнений, попавшими в зазор между ними. Эти частички циркулируют вместе с рабочей жидкостью по гидросистеме и неизбежно попадают в зазоры между деталями золотниковых пар. Кроме того, надо учитывать, что поверхность любого твёрдого тела волниста. Трущиеся поверхности золотника и гильзы изготавливают с чистотой в пределах 8-11 классов, для которых по ГОСТ 2789-59 высота неровностей достигает значений соответственно 3,2-0,4 мкм. В качестве материалов применяют хрупкие, а не пластичные, для того, чтобы исключить внедрение в поверхность частичек загрязнения с образованием вспучиваний. При попадании в зазор золотниковой пары частиц соизмеримого размера и большей твёрдости образуется дополнительная стружка. Другие, менее твёрдые частицы, приводят к упругому деформированию деталей пары. Частицы с большим размером будут разрушаться об острую переднюю кромку золотника на более мелкие и оказывать аналогичное воздействие, либо пластиически её деформировать, тем самым закупоривая зазор. Таким образом, механизм нарушения цилиндричности поверхностей золотника и гильзы заключается в воздействии на них частичек загрязнений различных размеров и твёрдости (рис. 1).

Кроме того, согласно данным работы [5] на величину неуравновешенной радиальной силы существенное влияние оказывает эксцентрисичное расположение золотника в гильзе, которое появляется в процессе сборки пары ввиду малых размеров золотника и гильзы и микронных зазоров между ними.

На основании вышеизложенного рассмотрим механизм развития заедания золотниковой пары (рис. 2). Описание процесса производится на примере одного пояска золотника, изображённого на рис. 1.

При сборке золотник установлен в гильзе с некоторым номинальным зазором s_{nom} и эксцентриситетом e_1 . На золотник действует перепад давлений $\Delta p = p_2 - p_1$. В рабочей жидкости присутствовали частицы загрязнений различного размера. В процессе эксплуатации крупные частицы 1 раскалывались об острую кромку на более

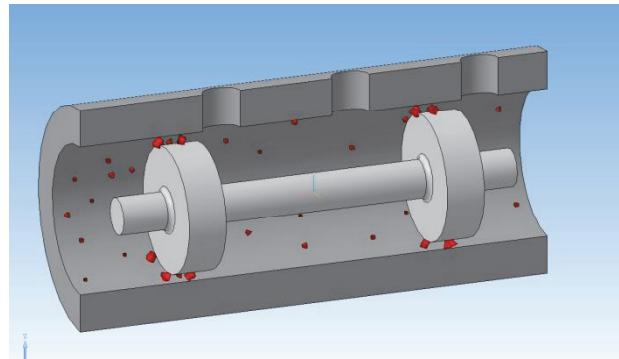


Рис. 1. 3D модель золотниковой пары под воздействием частиц загрязнения

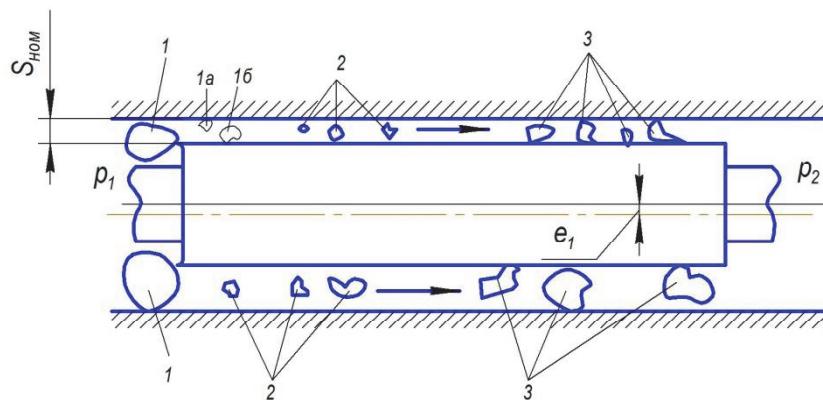


Рис. 2. Первый этап развития заедания золотниковой пары

мелкие (1а и 1б), увеличивая концентрацию опасных частиц. Частички 2, размер которых меньше зазора, проходили беспрепятственно, однако при контакте с поверхностями деталей пары деформировали их. Основная масса частиц 3, размер которых соизмерим с зазором, проходя между золотником и гильзой, способствовала интенсивному износу их поверхностей. Таким образом, с течением времени произошло нарушение цилиндричности поверхностей золотника и гильзы, выразившееся в том, что золотник приобрёл конусность h (рис. 3).

Из-за этого возникла неуравновешенная радиальная сила, смещающая золотник к гильзе, тем самым увеличивая эксцентриситет между их осями и уменьшая зазор между ними. Вследствие достаточно высокой поверхностной твёрдости

деталей пары процесс снятия материала с поверхности обладает малой интенсивностью, из-за чего некоторые частицы 4, попадая в зазор, застревали между золотником и гильзой.

На третьем этапе (рис. 4) количество застрявших в зазоре частиц 4 увеличивалось, т.е. произошло явление заращивания зазора по всей длине пояска. Силы трения в паре при этом возросли и при определённом минимально допустимом значении зазора превысили силу, потребную для перемещения золотника, что и привело к его заеданию в гильзе.

Далее, в качестве примера произведён расчёт минимально допустимого зазора для золотниковой пары ручного управления гидропривода КАУ-30Б, применяемого в каналах управления вертолёта Ми-8. Исходные данные для расчёта взяты на

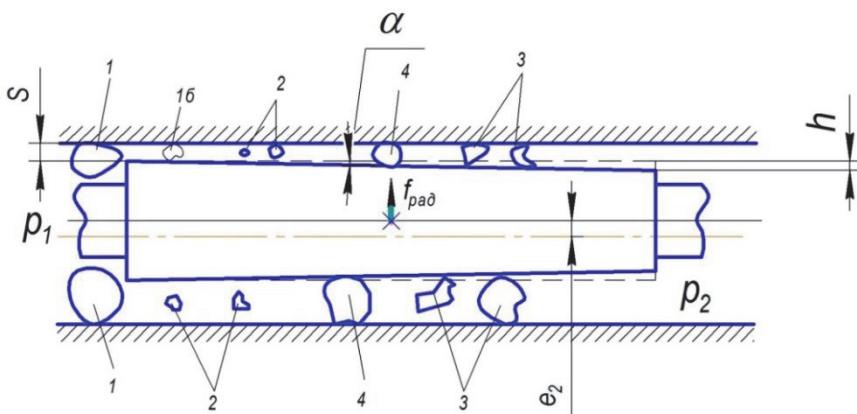


Рис. 3. Второй этап развития заедания золотниковой пары

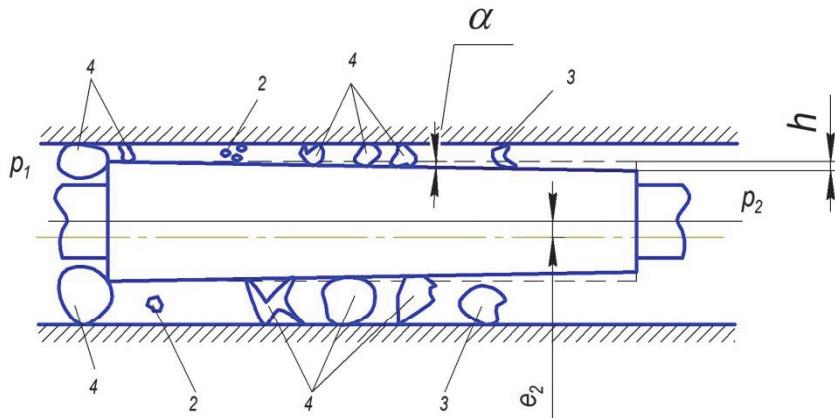


Рис. 4. Третий этап развития заедания золотниковой пары

основе разборки указанного агрегата в процессе ремонта на одном из авиаремонтных заводов: $e = 0,000006 \text{ м}$ – эксцентрикситет; $h = 0,000017 \text{ м}$ – конусность поверхностей золотниковой пары; $s_{\text{ном}} = 0,00001 \text{ м}$ – номинальный зазор; $l = 2 \cdot 0,006 \text{ м}$ – длина пояска золотника (в золотниковой паре гидропривода КАУ-30Б применён золотник с двумя поясками); $r = 0,005 \text{ м}$ – радиус золотника.

Рабочее давление в гидравлической системе вертолёта Ми-8 при её штатной работе поддерживается в диапазоне 4,5-6,5 МПа [6]. Исходя из этого рассчитаем величину радиальной силы и силы трения в паре при перепаде давления в паре (перепаде давления на пояске золотника) от минимального $\Delta p_{\min} = 4,5 \text{ МПа}$ до максимального $\Delta p_{\max} = 6,5 \text{ МПа}$.

Противодействовать движению золотника будет сила трения F_{mp} , которая рассчитывается по формуле: $F_{mp} = f_{pad} \cdot \mu \cdot \cos \alpha$, где μ – коэффициент трения, который с учётом вязкости и давления жидкости принимаем равным $\mu = 0,34$, а угол α – угол между поверхностью золотника и гильзы, образовавшийся вследствие появления конусности золотника (его величиной можно пренебречь

ввиду крайней малости). Как видно из формулы, она зависит от величины неуравновешенной радиальной силы f_{pad} – силы, прижимающей золотник к гильзе.

Результаты расчёта изменения силы трения в зависимости от зазора в золотниковой паре с использованием формулы 1 приведены в табл. 2 и показаны на рис. 5.

Линия (3) соответствует максимальной силе, равной 120 Н (12 кгс), согласно [6], которую необходимо затратить пилоту для страгивания золотника. Видно, что при величине зазора от 2,3 мкм и менее при высоком давлении, а также при величине зазора от 1 мкм и менее при низком давлении в паре сила трения по величине превышает страгивающую осевую силу и происходит заклинивание золотниковой пары. Соответственно минимальный зазор в данной паре, при котором сохраняется её работоспособность, должен быть больше 2,3 мкм. Таким образом, для любой золотниковой пары, зная её геометрические параметры, возможно рассчитать минимально допустимый зазор, при котором сохраняется её работоспособность. Сравнивая

Таблица 1. Результаты расчёта изменения силы трения в зависимости от зазора в паре

Зазор, мкм	Сила трения, Н				Зазор, мкм	Сила трения, Н			
	f_{\min}	F_{\min}^{mp}	f_{\max}	F_{\max}^{mp}		f_{\min}	F_{\min}^{mp}	f_{\max}	F_{\max}^{mp}
10	68,63	23,33	99,13	33,71	4,5	152,83	51,96	220,75	75,05
9,5	72,86	24,77	105,24	35,78	4	168,03	57,13	242,71	82,52
9	77,50	26,35	111,94	38,06	3,5	185,80	63,17	268,38	91,25
8,5	82,61	28,09	119,32	40,57	3	206,81	70,31	298,72	101,57
8	88,27	30,01	127,49	43,35	2,5	231,94	78,86	335,03	113,91
7,5	94,55	32,15	136,57	46,43	2,3	243,42	82,76	351,61	120,55
7	101,55	34,53	146,69	49,87	2	262,48	89,24	379,14	128,91
6,5	109,40	37,20	158,03	53,73	1,5	300,26	102,09	433,71	147,46
6	118,25	40,20	170,80	58,07	1	348,07	121,34	502,77	170,94
5,5	128,27	43,61	185,28	62,99	0,5	410,33	139,51	592,70	201,52
5	139,70	47,50	201,78	68,61					

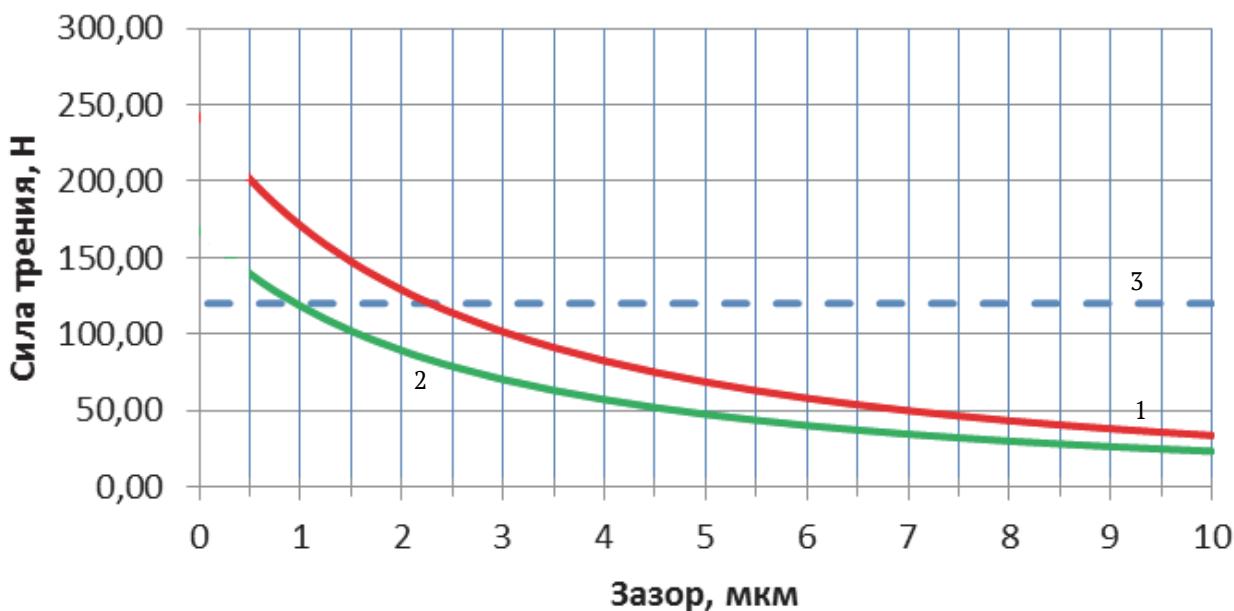


Рис. 5. Зависимость величины силы трения от зазора
 1 –сила трения в паре при $p = 6,5$ МПа; 2 – сила трения в паре при $p = 4,5$ МПа;
 3 – максимальное усилие для страгивания золотника

фактический зазор между золотником и гильзой с минимально допустимым, можно определить техническое состояние как золотниковой пары, так и гидропривода в целом.

На основании вышеизложенного была разработана методика, позволяющая определить техническое состояние гидропривода путем оценки зазора между золотником и гильзой при помощи замера среднего времени движения исполнительного штока [7]. Её целесообразно применять на этапе периодического технического обслуживания и ремонтных испытаний. Для оперативной оценки технического состояния гидропривода необходим другой подход. Идея заключается в том, что в случае нарушений в работе агрегата при прохождении через него РЖ возникнет значительная разница между концентрацией частиц загрязнения на его входе и выходе. Т.е., контроль чистоты РЖ в непосредственной близости от гидропривода позволит дать заключение

о его текущем состоянии. Для реализации этого метода необходимо средство, осуществляющее встроенный контроль чистоты РЖ в двух точках. Из всего многообразия современных приборов наиболее подходящим является отечественный анализатор загрязнения жидкости поточный ФОТОН - 965.2, предназначенный для измерения счётной концентрации частиц механических примесей в потоках жидкостей по размерным группам в соответствии с ГОСТ 17216-2001. ФОТОН-965.2 обеспечивает обмен данными с внешним компьютером и дистанционное управление. На рис. 6 приведена схема иллюстрирующая процесс оценки технического состояния гидравлического привода (золотниковой пары).

Для осуществления встроенного контроля чистоты РЖ хорошо подходят датчики встроенного контроля (ДВК) фотоэлектрического типа, т.к. возмущающие воздействия, создаваемые ЛА (шум, вибрация, электромагнитное



Рис. 6. Схема оценки состояния гидравлического привода (золотниковой пары)

излучение), не влияют на его точность и объективность. А сам по себе фотоэлектрический метод позволяет выявить частицы загрязнения из различных материалов (в том числе и немагнитных) в широком размерном диапазоне. ДВК размещаются на входе и выходе из гидропривода и регистрируют количество частиц, передавая информацию в анализатор загрязнений ФОТОН - 965.2. Прибор отправляет данные на персональный компьютер, где происходит обработка и преобразование информации. Далее согласно алгоритму (рис. 7) принимается решение о техническом состоянии гидропривода (золотниковой пары).

ВЫВОД

В развитии этой работы планируется провести испытания, в ходе которых будут установлены пороговые уровни разности числа частиц загрязнений на входе и выходе, связанные со степенью зарашивания зазора в золотниковой паре гидропривода. Испытания будут проведены с использованием стендового оборудования на базе лаборатории диагностики и надежности летательных аппаратов и двигателей СГАУ. Проведенные в статье исследования могут быть использованы для разработки методики упреждающего обслуживания гидравлических приводов ЛА.

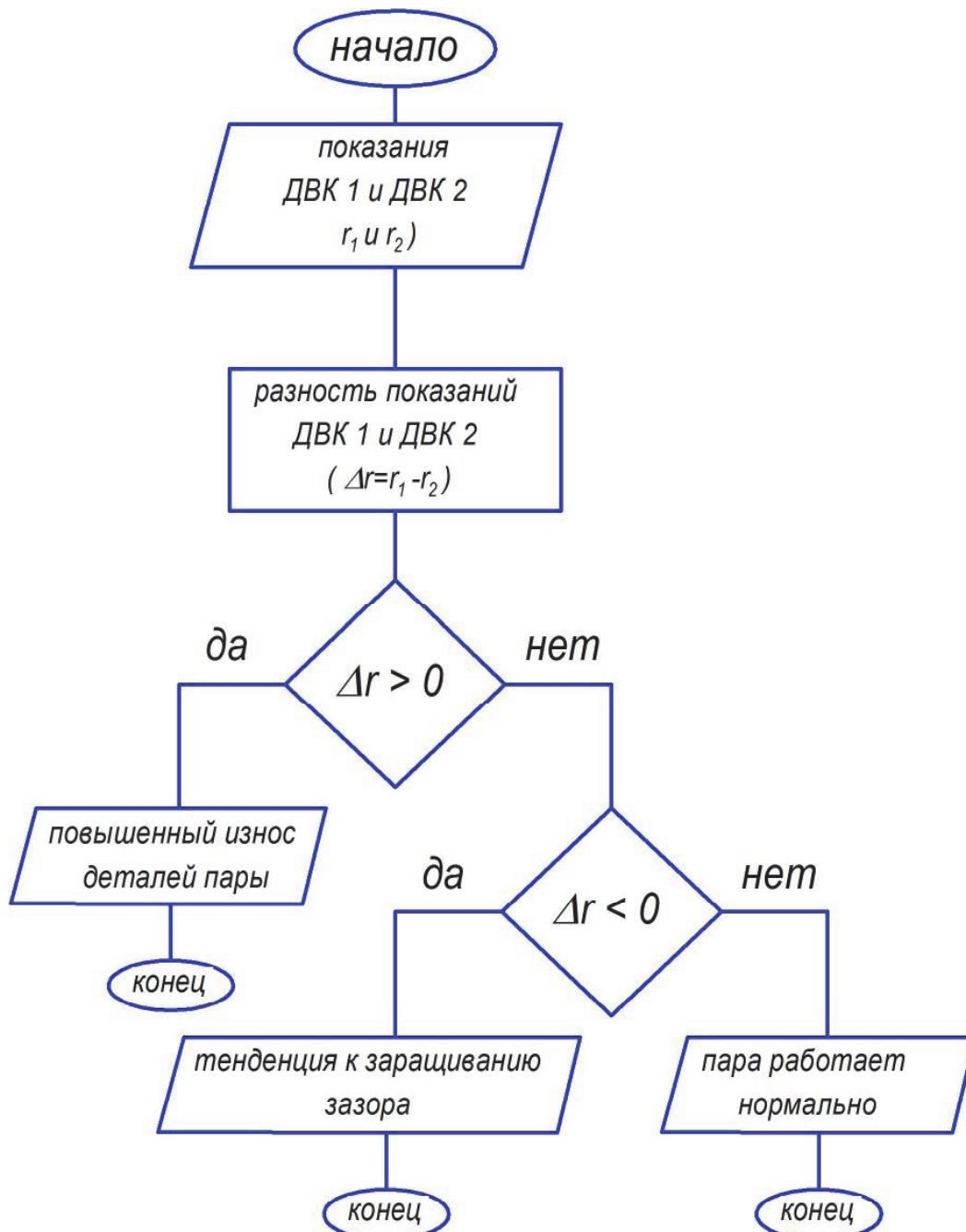


Рис. 7. Алгоритм принятия решения
для оценки состояния гидравлического привода (золотниковой пары)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимиркеев, Р.Г. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов [Текст] / Р.Г. Тимиркеев, В.М. Сапожников – М.: машиностроение, 1986. – 152 с.
2. Никитин, Г.А. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов [Текст] / Г.А. Никитин, С.В. Чирков – М.: Транспорт, 1969. – 183 с.
3. Гареев, А.М. Упреждающее обслуживание гидравлических систем летательных аппаратов [Текст]: монография/А.М.Гареев, Ю.П.Злобина, И.А.Попельнюк, Т.М.Гареев. - Самара: Издательство Самарского науч-
- ного центра Российской академии наук, 2014. - 168 с.
4. Гамынин, Н.С. Основы следящего гидропривода [Текст]/Н.С.Гамынин – М.: Оборонгиз, 1962. – 293 с.
5. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика [Текст]: справочное пособие / Т.М. Башта. - М.: Машиностроение, 1971. - 671 с.
6. Данилов, В.А. Вертолет Ми-8. Устройство и техническое обслуживание [Текст] / В.А. Данилов - М.: Транспорт, 1988. - 278 с.
7. Гареев, А.М. Исследование механизма заедания золотниковых пар авиационных гидроприводов [Текст] / А.М. Гареев, И.А. Попельнюк // Вестник Самарского государственного аэрокосмического ун-та. Том 14. -2015. - № 2. – С. 59-69.

DEVELOPMENT OF THE PROACTIVE MAINTENANCE TECHNIQUES FOR AIRCRAFT HYDRAULIC ACTUATORS BASED ON IN-LINE WORK FLUID PURITY CONTROL

© 2015 A.M. Gareyev, I.A. Popelnyuk, Y.P. Zlobina

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

The paper is devoted to the development of a techniques to implement a proactive maintenance of the aircraft hydraulic actuators based on in-line control of the work fluid purity. It is identified the weak element of the hydraulic actuator, which state determines the state of the machine in general. The effect of particle contamination on this item is study. It is develop schemes and decision-making algorithm for assessing of the technical condition of the hydraulic actuator.

Keywords: mechanical impurities, work fluid, proactive maintenance, hydraulic actuator, in-line control, work fluid purity.

*Albert Gareyev, Candidate of Technics, Associate Professor
of the Aircraft Maintenance Department.*

E-mail: gareevalbert@mail.ru

*Ilya Popelnyuk, Graduate Student at the Aircraft Maintenance
Department. E-mail: osni204@yandex.ru*

*Yulya Zlobina, Graduate Student at the Manufacture of
Aircraft and Quality Management in Engineering Department.
E-mail: yulya_zlobina11@mail.ru*