

УДК 629.7.08

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЁННОСТИ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ИХ ВЯЗКОСТЬ

И. А. Попельнюк

В статье рассмотрено важнейшее свойство рабочих жидкостей – вязкость. Исследовано влияние изменения вязкости рабочей жидкости на работоспособность гидравлической системы. Установлено, что поддержание оптимального значения вязкости крайне важно для обеспечения точности процессов в системе управления летательным аппаратом. Также доказано, что в случае отклонения значения вязкости от нормы ухудшается стабильность масляной плёнки, из-за чего могут возникать недопустимые химические реакции и повышенный износ трущихся поверхностей вследствие сухого трения. Проанализированы существующие методы измерения вязкости. Проведены теоретические исследования влияния изменения концентрации механических примесей, содержащихся в рабочей жидкости, на изменение её вязкости. Результаты исследования будут использованы для создания новой методики оперативной оценки вязкости рабочих жидкостей на этапе эксплуатации гидравлической системы.

Ключевые слова: гидравлическая система, рабочая жидкость, техническое состояние, механические примеси, загрязнения, вязкость, методика, масляная пленка.

Современный летательный аппарат (ЛА) – это самый сложный технический объект, состоящий из множества агрегатов и узлов, совокупность которых в свою очередь образует комплекс отдельных систем на его борту. Для приведения в действие систем управления самолётом и двигателем, других систем и агрегатов на самолёте используют различные виды энергии со значительными потребителями мощности. В зависимости от вида используемой энергии системы бывают гидравлические, газовые (пневматические) и электрические. Гидравлические системы (ГС) активно используются на борту ЛА ещё с 60-х годов 20 века в качестве одной из энергетических систем, имеющих жизненно важные агрегаты систем управления ЛА. Принцип действия таких систем основан на свойствах текучести и несжимаемости жидкости, которая, будучи заключённой в жёсткий трубопровод, способна передавать усилия как жёсткий стержень. Их широкое применение объясняется рядом преимуществ по сравнению с другими энергетическими системами.

ГС относятся к жизненно важным системам ЛА, то есть правильность её функционирования оказывает прямое влияние на безопасность полётов. В связи с этим конструкцией предусматривается две, а иногда и три независимых друг от друга ГС. Исполнительные агрегаты могут работать как параллельно от двух систем, так и от каждой по отдельности. Кроме того, проектирование, производство и эксплуатации ГС регламентируется множеством требований, описанных в различных мировых и отечественных стандартах. Любую ГС можно представить в виде совокупности механической её части (агрегатов, трубопроводов, арматуры) и «живой» части – рабочей жидкости (РЖ), состояние которой в значительной степени влияет на правильное функционирование всей системы.

Известно, что работоспособность ГС в значительной степени зависит от:

- давления жидкости;
- температуры жидкости;
- расхода жидкости;
- частоты колебаний жидкости;
- вязкости жидкости;
- антикоррозионных свойств жидкости;
- противоизносных свойств жидкости;
- противопенных свойств жидкости;
- антиокислительных свойств жидкости;

© Попельнюк И. А., 2016.

Попельнюк Илья Александрович

(iap.ssau@gmail.com),

аспирант кафедры эксплуатации
авиационной техники

Самарского университета,

443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

- плотности жидкости;
- модуля объёмной упругости жидкости;
- коэффициента поверхностного натяжения жидкости;
- испаряемости жидкости;
- загрязнения жидкости.

Совокупность значений этих параметров в любой момент времени определяет состояние РЖ. При этом все их можно условно разделить на внешние и внутренние. Внешние параметры (давление, температура, плотность, концентрация загрязнений и т.д.) изменяются под воздействием внешней эксплуатационной среды. Внутренние параметры (вязкость, антикоррозионные, антиокислительные, противопенные свойства и т.д.), характеризующие физико-химические свойства, закладываются на этапе производства и, что очень важно, изменяются с течением времени под воздействием внешних параметров.

В условиях эксплуатации ГС не представляется возможным оценить весь комплекс параметров РЖ. Поэтому на практике состояние РЖ определяют преимущественно по содержанию механических примесей и значению вязкости. Целью данной статьи является изучение всестороннее изучение понятия вязкости, влияния этого свойства РЖ на работоспособность гидравлических агрегатов, а также исследование влияния механических примесей на вязкость РЖ ГС ЛА.

Вязкость – свойство жидкости сопротивляться скольжению или сдвигу её слоёв. Она зависит от температуры и от давления жидкости. Суть её заключается в возникновении внутренней силы трения между движущимися слоями жидкости, которая определяется по формуле Ньютона:

$$T = \mu S \frac{dv}{dy} (H),$$

где S – площадь слоёв жидкости или стенки, соприкасающейся с жидкостью, m^2 ;

μ – динамический коэффициент вязкости, или сила вязкостного трения;

d/dy – градиент скорости, перпендикулярный к поверхности сдвига.

Отсюда динамическая вязкость равна:

$$\mu = \tau \frac{dy}{dv} (H \cdot c / m^2),$$

где τ – касательные напряжения жидкости, $\tau = T/S$.

При течении вязкой жидкости вдоль твёрдой стенки происходит торможение потока, обусловленное вязкостью. Скорость уменьшается по мере уменьшения расстояния y от стенки. При этом у поверхности стенки скорость падает до нуля, а между слоями происходит проскальзывание, сопровождающееся возникновением касательных напряжений τ .

Величина обратная динамическому коэффициенту вязкости ($1/\mu$) называется текучестью жидкости.

Отношение динамического коэффициента вязкости к плотности жидкости называется кинематическим коэффициентом вязкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} (m^2 / c)$$

Вязкость измеряется в Стоксах. Так $1 cm^2/c = 1$ Ст, а $0,01$ Ст – 1 сантистокс (сСт). Помимо оценки вязкости с помощью динамического и кинематического коэффициентов пользуются условной вязкостью – градусы Энглера ($^{\circ}E$). Вязкостью, выраженной в градусах Энглера, называется отношение времени истечения $200 cm^3$ испытуемой жидкости через капилляр $d = 2,8$ мм к времени истечения такого же объёма воды при $t = 20$ $^{\circ}C$. При этом

$$E = \frac{t}{t_{\text{воды}}}, \text{ где } t_{\text{воды}} = 51,6 \text{ с}$$

Одна из основных функций РЖ в ГС обеспечение смазки трущихся поверхностей агрегатов. Вследствие этого к ней предъявляются существенные требования по обеспечению на поверхности трущихся деталей прочных и устойчивых плёнок, исключающих возможность возникновения сухого трения и связанного с ним повышенного износа деталей. Кроме того, изменение вязко-

сти оказывает существенное влияние на точность системы управления ЛА. Так, слишком вязкая жидкость течёт медленнее и в управляющих каналах возникают недопустимые задержки и мёртвые зоны, а жидкость с низкой вязкостью, наоборот, ускоряет свое течение, что вызывает рассогласование управляющих устройств. По существующим нормам вязкость АМГ-10 не должна быть ниже 8,0 сСт. В то же время проведённые в ГосНИИ ГА исследования показали, что удовлетворительная смазывающая способность АМГ-10, при которой практически не ускоряется процесс изнашивания деталей агрегатов, сохраняется при вязкости, равной 6,7 сСт [1].

При эксплуатации РЖ подвергается температурным воздействиям, действию мощных звуковых полей и продавливается через зазоры в агрегатах. Всё это приводит к её деструкции и снижению вязкости. Для поддержания вязкости в требуемых пределах в процессе эксплуатации отечественных ВС предусмотрена периодическая её замена (полная или частичная). Такая замена обычно приурочивается к тяжелой форме ТО.

Процесс определения вязкости называется вискозиметрией, а приборы, которыми она определяется – вискозиметрами, которых на сегодняшний день существует несколько видов [2].

1) *Ротационный*. В таком вискозиметре исследуемая вязкая среда помещается в зазор между двумя соосными телами правильной геометрической формы (цилиндры, конусы, сферы или их сочетания). Одно из тел, называемое ротором, приводится во вращение с постоянной скоростью, другое остаётся неподвижным. Принцип действия ротационного вискозиметра основывается на нескольких положениях. Вращательное движение от одного тела (ротора) передаётся жидкостью к другому телу. Теория ротационного метода вискозиметрии предполагает отсутствие проскальзывания жидкости у поверхностей тел. Следовательно, момент вращения, передаваемый от одной поверхности к другой, является мерой вязкости жидкости. Суть опыта при определении вязкости состоит в измерении крутящего момента при заданной угловой скорости или по угловой скорости при заданном крутящем моменте. Для этих

целей вискозиметр ротационный снабжён динамометрическим устройством. Устройства, применяемые в вискозиметрах ротационных для измерения моментов и угловых скоростей, подразделяются на механические и электрические. Дальнейшие расчёты ведутся на основании теории метода ротационной вискозиметрии. Вискозиметры ротационные используются для измерения вязкости сред при температурах от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (масла) до $+2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расплавы металлов и силикатов) и позволяют вести измерения с погрешностью в пределах $\pm 3\text{--}5\%$.

2) *Вискозиметр Гепплера* относится к вискозиметрам с движущимся в исследуемой среде шариком. Действие вискозиметра Гепплера основано на законе Стокса о шарике, падающем в неограниченной вязкой среде. Прибор представляет собою трубку, выполненную из прозрачного (или непрозрачного) материала, в которую помещается вязкая среда. Вязкость определяется по скорости прохождения падающим шариком промежутков между метками на трубке вискозиметра, исходя из формул метода падающего шарика вискозиметрии. При использовании вискозиметра Гепплера возникают трудности, связанные с непрозрачностью вязкой среды либо трубки вискозиметра. В этом случае сложно определить местонахождение шарика; с целью преодоления такого характера трудностей были сделаны попытки внедрения в шарик вискозиметра материалов, излучающих рентгеновские лучи. В настоящее время в такого рода вискозиметрах применяется способ регистрации магнитных полей. Вискозиметр Гепплера и подобные ему используются для измерения вязкости различных сред и позволяют вести измерения с погрешностью в пределах $1\text{--}3\%$.

3) *Вибрационный* вискозиметр в самом простом случае представляет собой резервуар с вязкой жидкостью и некоторое тело (пластина, шар, цилиндр), называемое зондом вискозиметра, которое производит вынужденные колебания в вязкой среде. Сущность эксперимента заключается в определении изменений параметров вынужденных колебаний зонда вискозиметра при погружении его в вязкую среду. Руководствуясь теорией метода вибрационной вискозиметрии, по значениям этих параметров определяют

вязкость среды. Вибрационный вискозиметр имеет значительно большую чувствительность и также может быть применён для сред температурой до 2000 °С в инертной атмосфере или вакууме при наличии как больших, так и сравнительно малых масс расплавов. В настоящее время для измерения динамической вязкости широко применяют электронные вибрационные вискозиметры, в которых зонд совершает вынужденные колебания под воздействием импульсов электромагнитного вибратора со встроенным датчиком амплитуды. Вибрационные вискозиметры с электронным дистанционным управлением могут использоваться в условиях агрессивных сред. Относительная погрешность измерений при использовании вибрационного вискозиметра составляет $\pm 0,5-1\%$.

4) *Капиллярный* вискозиметр представляет собою один или несколько резервуаров с отходящими трубками малого круглого сечения, или капиллярами. Принцип его действия заключается в медленном истечении жидкости из резервуара через капилляр определённого сечения и длины под влиянием разности давлений. В автоматических капиллярных вискозиметрах жидкость поступает в капилляр от насоса постоянной производительности. Суть опыта при определении вязкости состоит в измерении времени протекания известного количества жидкости при известном перепаде давлений на концах капилляра. Дальнейшие расчёты ведутся на основании закона Пуазейля. Капиллярный вискозиметр за счёт простоты устройства и возможности получения точных значений вязкости нашёл широкое распространение в вискозиметрии жидкостей (масел, расплавов). Относительная погрешность измерений при использовании капиллярного вискозиметра составляет 0,1–2,5 %.

Анализируя современные вискозиметры можно сделать вывод о том, что главным, объединяющим их всех, недостатком является большая трудоёмкость работ по определению вязкости РЖ. Практически отсутствует возможность встроенного контроля вязкости, так как серийные ротационные вискозиметры, которые теоретически возможно монтировать в гидравлическую магистраль, не устойчивы к шуму и вибрациям, создаваемым ЛА в полёте.

Однако кроме прямых методов для измерения вязкости можно использовать и косвенные. Наиболее перспективным с этой точки зрения выглядит оценка вязкости РЖ по содержанию в ней механических примесей, так как этот показатель обладает высокой степенью информативности (загрязнения содержатся в РЖ на всех этапах эксплуатации [3]) и прост в определении (на сегодняшний день существует множество разнообразных средств, реализующих различные методы оценки чистоты РЖ).

На макроуровне вязкость влияет на два параметра РЖ. В первую очередь – на её расход. Исходя из формулы Пуазейля, расход РЖ находится в прямой зависимости от разности давлений на входе и выходе трубы, четвёртой степени её радиуса, плотности жидкости и в обратной зависимости от коэффициента вязкости и длины трубы [4].

$$Q = \pi \rho \frac{P_1 - P_2}{8\eta L} \cdot R^4 \quad (1)$$

Рассмотрим объём РЖ (V) массой (M), в который вносится некоторое количество загрязнений массой (m) общим объёмом (v). Тогда плотность загрязнённой жидкости можно найти по формуле:

$$\rho_2 = \frac{M + m}{V + v}, \quad (2)$$

где ρ_2 – плотность объёма РЖ с загрязнениями.

Изменением объёма в виду малости можно пренебречь ($V \approx V + v$) и сделать вывод о том, что плотность РЖ при её загрязнении увеличивается. Подставляя (2) в (1) при прочих равных параметрах и выполнив необходимые преобразования, получим:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{M + m}{M} \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что внесение загрязнений в РЖ вызывает увеличение расхода и соответственно снижение её вязкости.

Таблица 1

**Исходные данные и результаты расчёта изменения массы и объёма пробы
при загрязнениях РЖ с 7 до 9 класса**

Размерная фракция, мкм	Число частиц	Средний размер частиц, мкм	Радиус частицы, м	Изменение объёма, м ³	Изменения массы, кг
5 – 10	6000	7,5	0,00000375	$1,32 \cdot 10^{-12}$	$5,29 \cdot 10^{-9}$
10 – 25	3000	17,5	0,00000875	$8,41 \cdot 10^{-12}$	$3,36 \cdot 10^{-8}$
25 – 50	300	37,5	0,00001875	$8,27 \cdot 10^{-12}$	$3,31 \cdot 10^{-8}$
50 – 100	38	75	0,0000375	$8,39 \cdot 10^{-12}$	$3,35 \cdot 10^{-8}$
100 – 200	8	150	0,000075	$1,41 \cdot 10^{-11}$	$5,65 \cdot 10^{-8}$
			ИТОГО	$4,05 \cdot 10^{-11}$	$1,621 \cdot 10^{-7}$

В качестве примера рассмотрим изменение плотности жидкости при увеличении концентрации загрязнений (табл. 1). При расчётах использовались данные о содержании частиц загрязнения различных размерных фракций при изменении их концентрации с 7 до 9 класса чистоты по ГОСТу 17216-91 в стандартной пробе 100 см³. Кроме того, из того же ГОСТа были взяты справочные данные о средней плотности частиц загрязнений 4000 кг/м³ и средней плотности РЖ 1000 кг/м³.

Изменение объёма пробы в результате загрязнений рассчитывалось по формуле:

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi r^3 N,$$

где N – число частиц загрязнений, поступающих в РЖ.

Изменение массы пробы в результате загрязнений рассчитывалось по формуле:

$$\Delta m = \rho \cdot V,$$

где ρ – средняя плотность частиц загрязнения.

Анализируя представленные в таблице 1 данные, можно сделать несколько важных выводов.

1) Попадание частиц загрязнения вызывает изменение как массы пробы, так и её объёма. При этом изменение массы почти в два раза превосходит изменение объёма, а значит, вышеизложенный тезис о возможно-

сти пренебрежения величиной изменения объёма при расчётах верен.

2) Величины изменения массы и объёма под воздействием загрязнений малы и на практике существенного изменения расхода РЖ не вызовут (во всяком случае в пределах соседних классов). Однако, если рассматривать изменение чистоты жидкости от исходного уровня (4–5 класс чистоты) до предотказного (10–11 класс), то изменения расхода, а значит и вязкости, будут значительные.

С другой стороны, вязкость влияет на толщину и стабильность смазывающей пленки, состояние которой, как упоминалось выше, крайне важно для обеспечения правильного функционирования гидравлических агрегатов.

Механические примеси изменяют структуру потока, вызывая его турбулизацию (рис. 1). Рассмотрим участок трубопровода, в котором поток РЖ вместе с частицами загрязнений перемещается в направлении Q . Эти частички обтекаются потоком с разными скоростями (там, где путь от А до В больше, с большими скоростями и наоборот). Вследствие разности скоростей градиенты давлений на верхней и нижней поверхностях частички неодинаковы (следует из уравнения неразрывности). Под действием перепада давлений происходит движение частицы в направлении потока и вверх (позиции 1–2). При этом одновременно частица вращается вокруг своей оси, и в некоторый момент времени (позиция 3) характер её обтекания меняется на противоположный. Далее движение происходит в направлении потока и вниз (позиции 4–5).

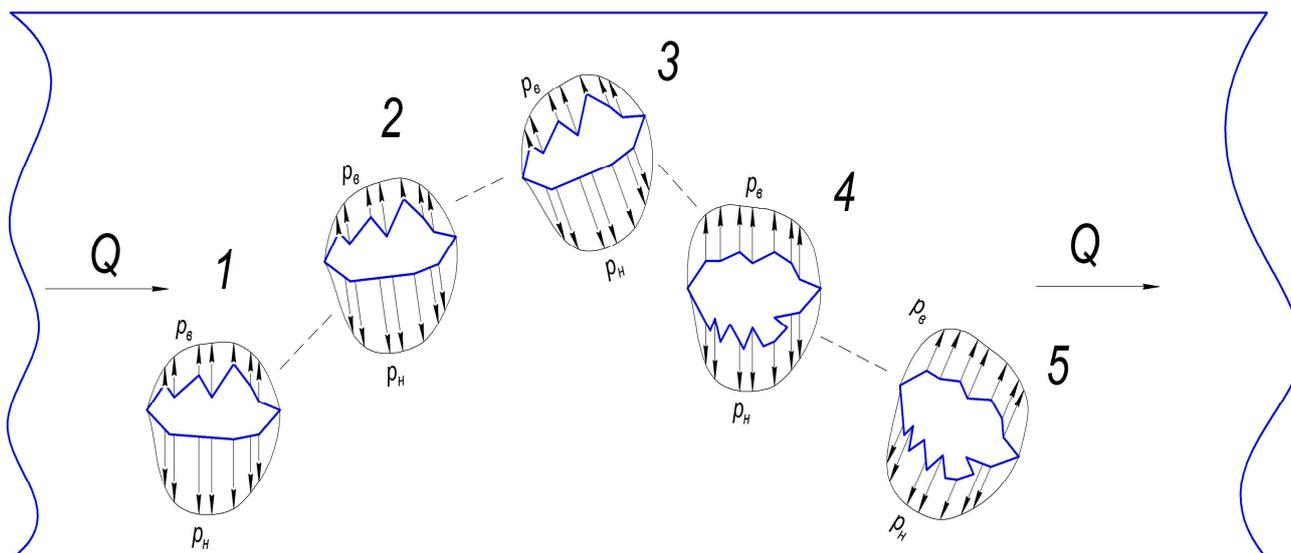


Рис. 1. Механизм турбулизации потока РЖ частичками загрязнений

Заключение

Таким образом, механические примеси, двигаясь с потоком РЖ и одновременно в радиальном направлении, дополнительно турбулизуют поток и способствуют повышенному пенообразованию и возникновению такого опасного явления, как кавитация. Частицы загрязнений нарушают состав масляной плёнки на поверхностях трения, тем самым повышая вязкость РЖ. Вследствие нарушения стабильности пленки химические реакции окисления и коррозии на этих поверхностях протекают гораздо интенсивнее. Недостаточная толщина и равномерность смазывающей плёнки (в том числе и из-за низкой вязкости) способствует повышенному износу трущихся поверхностей гидравлических агрегатов. Таким образом, можно утверждать, что кроме ухудшения вязкости механические примеси снижают антиокислительные, антикоррозионные, противоизносные свойства РЖ [5].

Также загрязнения способствуют ухудшению термостабильности и увеличению такого важного показателя, как сжимаемость РЖ, что, в конечном счете, оказывает существенное влияние на точность работы ГС.

Таким образом, в рамках данной работы были рассмотрены понятие вязкости РЖ и методы её измерения. Кроме того, исследовано влияние вязкости на работоспособ-

ность ГС, а также изучена зависимость поступления механических примесей в РЖ на её вязкость. По результатам работы можно утверждать, что загрязнения оказывают всестороннее деструктивное влияние на все свойства РЖ, а в особенности на её вязкость, что способствует ухудшению её состояния и снижению надёжности и безотказности всей ГС.

В продолжение этой работы планируется провести практические исследования изменения вязкости РЖ в зависимости от содержания в ней механических примесей различных размерных фракций и концентраций.

Литература

1. Кузнецова Г. В. Диагностирование состояния гидромашин в течение приработки по загрязнённости // Изв. вузов: Машиностроение. 1983. № 8. С. 81–84.
2. Методы визкозиметрии. URL: <http://www.viskozimetr.ru/info/6.html> (дата обращения: 01.07.2016).
3. Коновалов В. М., Скрицкий В. Я., Рокшевский В. А. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. М.: Машиностроение, 1976. 288 с.
4. Некрасов Б. Б. Гидравлика и её применение на летательных аппаратах. М.: Машиностроение, 1967. 368 с.
5. Кондаков Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.

INFLUENCE OF CONTAMINATION ON THE HYDRAULIC SYSTEMS WORK FLUID VISCOSITY

I. A. Popelniuk

The article deal with the main property of the hydraulic system work fluid – viscosity. The effect of the viscosity values changes on the hydraulic systems performance is studied. It is found, that maintaining the optimum value of viscosity is extremely important to ensure the accuracy of processes in an aircraft control system. Furthermore, in the case of deviations from normal values of viscosity, deteriorating the stability of the oil film, because of which there may be unacceptable chemical reactions and increased wear of the rubbing surfaces as a result of dry friction. The existing methods for measuring the viscosity are analyzed. Theoretical investigations of the mechanical impurities concentration changes impact to change of its viscosity is studied.

Key words: hydraulic system, work fluid, technical state, mechanical impurities, contaminations, viscosity, method, oil film.

Статья поступила в редакцию 22.08.2016 г.