

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

Е.А. Коняев, М.Л. Немчиков

**ХИММОТОЛОГИЯ АВИАЦИОННЫХ МАСЕЛ И  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ.**

**Москва 2008**



## Содержание

	Стр.
.Введение.....	4
1. Основные сведения о трении и смазке.....	5
2. Устройство маслосистем.....	21
2.1 Типичные схемы циркуляционных систем.....	26
3. Условия работы авиационных масел.....	26
3.1 Общие требования к маслам.....	28
3.2 Основные сведения о производстве масел .....	28
3.3 Получение основ нефтяных масел.....	30
3.4 Синтетические базовые масла.....	35
3.5 Кремнийорганические соединения.....	37
4. Присадки к авиационным маслам и механизм их поведения в составе товарных продуктов.....	41
4.1 Вязкостные свойства масел.....	41
4.2 Смазывающая способность масел.....	46
4.3 Стабильность масел.....	48
5. Условия работы масел в ТРД.....	51
6. Особенности смазки ТВД.....	53
7. Масла для вертолетов.....	54
8. Изменение физико-химических свойств масла во время рабо- ты в реактивном двигателе.....	54
9. Масла для авиационных поршневых двигателей.....	57
9.1 Изменение физико-химических свойств масла в поршневом двигателе.....	58
10. Ассортимент авиационных масел для ГТД отечественного производства.....	63
10.1 Минеральные масла.....	64
10.2 Синтетические масла.....	64
11. Зарубежные аналоги отечественных масел.....	66
12. Унификация ассортимента авиационных масел.....	68
13. Комплекс методов квалификационной оценки масел для ГТД...70	
14. Гидравлические авиационные жидкости.....	72
14.1 Общие требования и свойства.....	73
15. Литература.....	81

## Введение

Главным назначением смазки любого механизма является уменьшение износа трущихся деталей и уменьшение мощности, которая затрачивается на это. Кроме этого смазывающие материалы отводят тепло от нагретых узлов двигателя, предохраняют детали машин от коррозии, очищают пространство между трущимися поверхностями от продуктов износа, механических примесей и т.д.

Чтобы правильно подобрать и применить масло, необходимо прежде всего знать основные закономерности процессов трения и изнашивания деталей машин, знать условия, в которых работают масла, их качество, состав и возможные изменения качества и состава масел при работе двигателя и других машин и агрегатов.

В начале XX века, когда разработка автомобильных и авиационных двигателей носила революционный характер, главной заботой конструкторов двигателей было обеспечить их работоспособность хотя бы на короткое время. Вопрос обеспечения долговечности двигателей в тот период не был первоочередным, так как даже к моменту окончания первой мировой войны, где двигатели прошли апробацию и вполне обеспечили решение боевых задач ресурс авиационных двигателей составлял всего 18-24 часа, а максимальный у американского двигателя «Либерти» - 100 часов. Ресурс автомобильных двигателей был выше, но не превышал 300 часов. В 1934 г Советское правительство поставило задачу разработать двигатель ГАЗ А (его прототип Форд А) с межремонтным ресурсом 10 000 км.

Ресурс двигателей того периода ограничивался износом коленчатого вала и гильз цилиндров, а закономерности износа выявлялись с трудом. Так, известный исследователь Х. Риккардо в 1933 г. Говорил о том, что Наиболее неприятной и наименее понятной неполадкой является выкрашивание баббита в шатунных подшипниках. Загадочно для автора не само выкрашивание, а массовость и непостоянство этого явления... Трудно объяснимым является не столько выкрашивание подшипников, сколько полное отсутствие подобных неполадок у некоторых фирм, и чем глубже исследовать экспериментальный материал, тем загадочнее и противоречивее представляется вся эта проблема. Теоретическое обоснование процесса всех видов износа тогда отсутствовало, и А.К. Зайцев, поставив задачу обобщить весь известный материал по этому вопросу, писал о том, что если по гидродинамической теории трения и смазки имеется ценный и оригинальный материал, то проблема трения и износа машин и механизмов еще совершенно не объединены; имеются лишь отдельные разрозненные работы и статьи в периодической литературе и в сборниках трудов специальных конференций.

«Загадочность» проблемы износа двигателей во многом объясняется тем, что она выходит за рамки звена конструктор двигателя – производитель масел.

Большое, а в рассматриваемый период, возможно, решающее значение имели особенности эксплуатации техники. Недостаточная квалификация специалистов в области эксплуатации, их слабые знания в вопросах смазки деталей и механизмов, недостаточное техническое обслуживание двигателей и т.п. – один из потенциальных источников возникновения проблемы. Не обобщая опыт эксплуатации, конструктор двигателя не имел обратной связи и не мог учесть при разработке его эксплуатационные особенности. Сколь велики «накладки», обусловленные некачественной эксплуатацией двигателей, можно судить по некоторым публикациям рассматриваемого периода. М. Файнгар, заместитель редактора научно-технического бюллетеня Органефти отмечал, что не всегда получается удовлетворительный результат эксплуатации. Здесь главная причина кроется в малоквалифицированном обращении с машинами, подчас в безобразной эксплуатации этих машин и в большей степени – в неумении правильно хранить и применять нефтепродукты. Мы имеем многочисленные факты того, как аварии тракторов, автомашин и другой автомобильной техники с легкостью объясняются только низким качеством нефтепродуктов.

Главная беда не в том, что технические нормы (на нефтепродукты) у нас недостаточно жестки, главная беда в другом, - что как керосин, так и автолы заправляются в плохо отремонтированные трактора, в подшипники которых залиты суррогатным баббитом, в трактора, картеры которых даже после ремонта остаются грязными, т.е содержат большое количество грязи, песка, волокон от обтирочных материалов и т.п.

Беда в том, что автолы перед заправкой не фильтруются и вместе с ними в мотор попадает грязь, вода, солома, кусочки тряпок, бумаги и т.п. Сетки для масла для ускорения фильтрации пробиваются гвоздями.

В 1937 г. А.Г. Попич рекомендовал перед заливом автола в картер двигателя масла оно должно быть обязательно профильтровано через сетку во избежание попадания в двигатель механических примесей, могущих привести к прекращению подачи масла к подшипникам и ускоренному износу как подшипников, так и поршневой группы.

Интересный случай описал К.К. Папок, ссылаясь на конструктора А.С. Яковлева. Он пишет, что известный конструктор Ильюшин на яковлевском самолете потерпел аварию. При свидании с конструктором он сказал: «Саша, к тебе претензий нет. Самолет замечательный, но, оказывается, мотор без масла не работает. Авария произошла по вине техника, который забыл заправить самолет маслом.

## **1.Основные сведения о трении и смазке**

По мере накопления опыта эксплуатации двигателей и совершенствования их конструкций появились более четкие критерии оценки качества авиационных масел, которые были призваны обеспечить увеличение рабочего ресурса двигателя и его работы в форсированных, более напряженных

условиях, которые были необходимы для создания современных летательных аппаратов как с использованием турбовинтовых, так и турбореактивных двигателей.

Для решения всего комплекса задач, стоящих перед конструкторами и эксплуатационниками двигателей летательных аппаратов (ЛА) следует как можно точнее знать условия работы масла в двигателе и агрегатах ЛА, режимы, характерные для условий их трения, поведение масел в условиях взаимодействия с конструкционными материалами в широком интервале рабочих параметров.

Одним из основополагающих направлений изучения работы масел в двигателях является определение основных закономерностей процессов их трения и износа.

При работе деталей машин различают три принципиально отличные друг от друга вида трения: жидкостное, граничное и сухое трение.

Когда две движущиеся друг по другу поверхности разделены слоем масла, возникает жидкостное трение, т.е. трение между слоями и молекулами масла. Коэффициент жидкостного трения лежит в пределах 0,001-0,010. К пленке масла, разделяющей движущиеся детали, могут быть применимы законы гидродинамики, причем вязкость масла является в данном случае основным фактором.

Петров Н.П., основываясь на законе И.Ньютона (для трения жидких тел) и на своих многочисленных опытах, впервые математически описал закон жидкостного трения и предложил для практического пользования упрощенную формулу:

$$(1) \quad F = \frac{\eta S v}{h}$$

где:  $F$  – сила жидкостного трения, Н  
 $\eta$  – абсолютная вязкость масла, Н•сек/м<sup>2</sup>;  
 $v$  – скорость перемещения трущихся поверхностей, м/сек;  
 $S$  – площадь соприкасающихся трущихся тел, м<sup>2</sup> ;  
 $h$  – толщина смазочного слоя, м.

Из приведенной формулы видно, что при жидкостной смазке (гидродинамический режим смазки), трение в подшипнике зависит, в основном, от вязкости масла и не зависит ни от материала деталей подшипника, ни от состояния трущихся поверхностей.

При жидкостном трении надежность смазки возрастает с увеличением скорости вращения трущихся поверхностей и с увеличением вязкости масла, что можно видеть, подставив в уравнение 1 величину силы трения, выраженную через коэффициент трения и приложенную нагрузку:

$$(2) \quad F = Nf$$

где  $N$  – приложенная сила, нормальная к поверхности трения, Н;  
 $f$  – коэффициент трения.

Тогда выражение (1) примет следующий вид:

$$N = \frac{\eta S v}{hf}$$

С другой стороны, с увеличением скорости движения трущихся поверхностей и вязкости масла увеличивается и сила трения [уравнение (1)], т.е. возрастают потери мощности на трение. Это противоречие разрешается путем подбора масла надлежащей вязкости: для быстро вращающегося вала в подшипнике берут масло меньшей вязкости, для медленно вращающегося – большей вязкости. Гидродинамический режим смазки является наиболее приемлемым для трущихся деталей, т.к. он обеспечивает малый износ деталей и малые потери мощности на трение.

При повышении нагрузки на масляную пленку при понижении вязкости масла или снижении скорости движения поверхностей уменьшается толщина пленки.

С уменьшением толщины масляной пленки наступает момент, когда через пленку начнут проступать отдельные неровности, имеющиеся на поверхности, приводящие к контакту трущихся поверхностей. Наступает граничный режим смазки. С увеличением числа контактируемых точек область граничной смазки будет постепенно расширяться за счет уменьшения жидкостной смазки. Такое состояние, когда наряду с жидкостной смазкой имеет место и граничная смазка, принято называть полужидкостной или смешанной смазкой.

В условиях граничной смазки основные характеристики трения износа определяются состоянием тонкой, адсорбированной на поверхностях трения масляной пленки. Устойчивость таких граничных слоев масла при трении зависит от свойства, называемого маслянистостью, природа которого еще недостаточно изучена. Это тончайшие слои смазки очень прочно связаны с металлическими поверхностями адсорбционными силами.

Исследование тонких смазочных слоев показали, что масло в этих слоях коренным образом отличается от масла в объемных условиях. Эти пленки ведут себя как пластичные тела, имеющие определенную величину напряжения сдвига. Они обладают способностью раскливающего действия. Эффект раскливания состоит в том, что в тонких граничных слоях развивается давление не только препятствующее сближению поверхностей, на которые нанесена пленка, но и стремящееся его раздвинуть. Давление это растет с уменьшением зазора. Раскливающее действие увеличивается со скоростью, т.е. имеет не только статический, но и динамический характер, что особенно важно, так как смазке подвергаются поверхности, имеющие относительное перемещение. Формирование граничных смазочных слоев рассматривается как одно из явлений кристаллизации. Они представляют собой моно или поликристаллические тела, возникающие за счет зародышевой функции первичного слоя.

В очень тонких слоях масляные пленки под двусторонним воздействием трущихся поверхностей обнаруживают исключительный антифрикционный эффект. Молекулы смазочных веществ в граничных слоях, обеспечивают достаточно большую прочность на сжатие и легкость сдвигов в горизонтальном направлении. Этим и объясняются небольшие коэффициенты трения при скольжении смазанных поверхностей. Причем, как показали исследования П.А. Рибиндера, во многих случаях смазка, достаточно интенсивно снижающая трение, может значительно увеличить износ.

Необходимо помнить о двойственной роли смазки. Выяснилось, что эта двойственная роль находит достаточно определенное теоретическое объяснение в том, что смазочное действие всегда проявляется как на наружной поверхности металла, на границе металла с окружающей средой, так и внутри металла в его наружном слое. Активные полярные компоненты смазки, т.е. высшие жирные кислоты, органические соединения, содержащие галогены и серу, способствуют резкому повышению возможности для масел проникать в металл, на чем основан механизм действия противоизносных и противозадирных присадок, используемых в композициях масел. Дело в том, что в пластически деформированном поверхностном слое металла появляются микро и ультрамикрощели между кристалликами и в отдельных кристалликах по плоскостям скольжения. По этим микротрещинам смазка проникает тем активнее, чем выше ее маслянистость.

При трении металлов поверхностные слои разогреваются до значительных температур. Количество тепла, выделяющегося при трении, зависит от скорости скольжения, нагрузки на трущиеся поверхности, свойств металлов, из которых изготовлены детали и свойств смазки. При увеличении скорости скольжения или нагрузки увеличивается количество тепла, выделяемого в процессе трения, - повышается температура граничной пленки масла. При достижении критической температуры, характерной для каждого сорта смазки, граничная пленка теряет смазывающую способность. Происходит разрыв граничной пленки и резко увеличивается износ металла. При постоянных значениях нагрузки и скорости скольжения аналогичная закономерность проявляется при повышении температуры окружающей среды.

Исследования Б.И. Костецкого показали, что возникновение и характер протекания процессов схватывания металлов зависит от природы масел. Большое влияние на процесс граничного трения оказывают окислительные процессы, т.к. продукты окисления углеводородных масел и поверхностных слоев металлов существенно изменяют интенсивность износа и величину коэффициента трения. Окисные слои играют важнейшую защитную роль, предотвращая интенсивное схватывание металлов. Однако при легких режимах трения интенсивное протекание процессов окисления ведет к усилению износа – развивается химический окислительный износ.

Предотвращение схватывания металлов при трении может быть достигнуто, если на их поверхности образуются защитные слои химических соединений,



отличные по своей природе от окисных. Это могут быть слои сульфидов, хлоридов, фосфидов металлов, слои металлических мыл и других веществ, присутствующих в составе противоизносных присадок к маслам.

Существенное влияние на процессы, происходящие в пленках масел, оказывает и состав газовой среды зоны трения. В газовой среде, не содержащей кислород, происходит схватывание и заедание металлических поверхностей, а там, где кислород присутствует, изнашивание при граничной смазке происходит без схватывания и заедания.

Как было отмечено выше, при эксплуатации двигателей и механизмов наблюдается износ деталей и узлов трения агрегатов топливно-масляной системы, обусловленный процессами трения, абразивным воздействием топливной, масляной среды и кавитацией.

**Трение** (внешнее) представляет собой сопротивление относительно к перемещению, возникающее между телами в зонах их соприкосновения по касательной к ним. Различают **трение движения**, т.е. трение твердых тел, находящихся в движении друг относительно друга, и **трение покоя**, под которым понимается сопротивление относительно перемещению двух тел в процессе микросмещения, но без макросмещения (т.е. до начала перемещения одного тела относительно другого). Трение в значительной степени определяет энергетические потери при работе машин и механизмов, поглощая до 30-40% всей вырабатываемой в мире энергии. В то же время работа ряда агрегатов современной техники основана на использовании явления трения (механические тормоза, фрикционные устройства, движители ряда мобильных машин и т.д.), так же, как и некоторые технологические процессы, например, сварка трением и т.д.

**Сила трения** – это сила сопротивления относительно перемещению одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная относительно по отношению общей границы между этими телами. Сила трения покоя, как правило, выше чем трение движения.

В силу неизбежно возникающих в процессе обработки волнистости и шероховатости поверхностей контактирующих деталей их механический контакт представляет собой совокупность точек (пятен) контакта, через которые передаётся давление, прижимающее эти тела друг к другу. Иначе говоря, механический контакт реальных твердых тел **дискретен** и осуществляется в результате деформирования вершин поверхностей и волн. Различают **номинальную площадь контакта**, т.е. геометрическую площадь соприкосновения деталей, **контурную площадь контакта**, т.е. площадь контакта, образовавшаяся при деформации обычно упругих вершин волн, **фактическую площадь контакта**, которую составляют деформированные приложенной нагрузкой сопряженные вершины микронеровностей, расположенных в пределах контурной площади контакта, т.е. на вершинах волн (рис. 1).

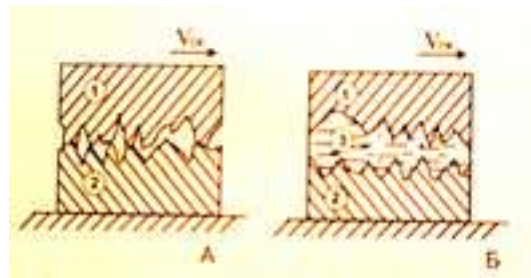


Рис. 1. Схема контакта рабочих поверхностей твердых тел.

1- Номинальная площадь контакта; 2- контурная площадь контакта; 3- фактическая площадь контакта; А- граничное трение; Б – жидкостное трение

Фактическая площадь контакта составляет незначительную долю ( от сотых и тысячных долей до 20-40%) от номинальной.

Взаимодействие трущихся тел осуществляется по изолированным друг от друга пятнам фактического контакта, и сила трения является равнодействующей элементарных сил трения, возникающих на пятнах фактического контакта. Сила трения направлена противоположно относительному движению тел.

По кинематическому признаку внешнее трение подразделяют на трение скольжения и трение качения.

**Трение скольжения** – это трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению или направлению. На рис.2 скорость подвижного тела А ( $V_a$ ) отлична от скорости неподвижного тела В ( $V_b=0$ ).

**Трение качения** - это трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел одинаковы по значению и по направлению, по крайней мере, в одной точке контакта. Так, на рис 2 приведена схема сил, действующих на цилиндр А, катящийся по поверхности В (например колесо по дороге). В зоне контакта (в точке а)  $V_a = V_b$ . Если при той же схеме контакта  $V_a$  не равна  $V_b$ , то имеет место трение качения со скольжением (как в зубчатой передаче кроме трения в зоне зацепления).

При рассмотрении процесса трения скольжения в первом приближении используют экспериментально установленные закономерности, известные в литературе как законы Амонтона:

1. Сила трения  $F$  пропорциональна усилию  $N$ , сжимающему трущиеся тела в направлении нормальном по отношению к поверхности трения (номинальной поверхности, по которой осуществляется взаимодействие твердых тел при внешнем трении), т.е  $F=f \cdot N$ , где коэффициент пропорциональности  $f$  называется **коэффициентом трения**. Этот коэффициент является важнейшей сравнительной характеристикой, позволяющей сопоставить трение различных тел в различных условиях безотносительно к нагрузке на узел трения.

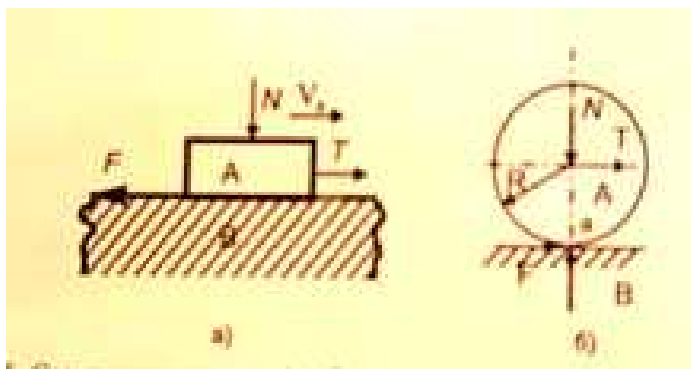


Рис.2. Схема контакта тел А и В при трении:

а – скольжения и б – качения:  $N$  – нормальная нагрузка;  $T$  – тангенциальное усилие;  $F$  – сила трения;  $R$  – радиус цилиндра

- Сила трения не зависит от номинальной площади контакта. Этот закон является следствием того, что трение осуществляется по фактической площади контакта, слабо зависящей от номинальной.

В настоящее время установлено, что сила трения  $F$  складывается из двух составляющих: механической  $F_{\text{мех}}$  и молекулярной  $F_{\text{мол}}$ . Механическая составляющая силы обуславливается деформированием контактирующих тел на узлах фактического контакта в процессе трения. Молекулярная составляющая, обусловленная межмолекулярными и межатомными взаимодействиями, в свою очередь делится на адгезионную (силу прилипания между поверхностными слоями двух разнородных тел, приведенных в соприкосновение) и когезионную (сцеплению одного и того же тела, обусловленное действием сил межмолекулярного взаимодействия) составляющие. Адгезионная составляющая силы трения – это сила сопротивления перемещению твердых тел, обусловленная адгезией между ними на участках фактического контакта. По мере относительного перемещения трущихся тел, происходит образование и разрушение адгезионных связей между контактирующими телами на участках фактического контакта.

Когезионная составляющая силы трения проявляется в тех случаях, когда адгезия контактирующих твердых тел выше, чем когезионные силы, обеспечивающие целостность менее прочного из контактирующих тел. В таких случаях по мере относительного движения происходит не разрушение адгезионных связей, а разрыв когезионных связей в менее прочном материале, в результате чего имеют место вырывы и перенос частиц одного тела на поверхность другого, т.е. внешнее трение твердых тел переходит во внутреннее трение в менее прочном теле. Согласно И. В. Крагельскому, внешнее трение твердых тел осуществляется в том случае, когда имеет место положительный градиент механических свойств материалов контактирующих свойств по глубине. В этом случае деформации сосредотачиваются в тонком поверхностном слое. Практически все методы снижения трения сводятся к обеспечению существования положительного градиента механических свойств.

**Процессы, обусловленные трением.** Трение твердых тел неизбежно сопровождается рядом явлений – изнашиванием сопряженных тел, их нагревом (и нагревом окружающей среды), структурными превращениями в поверхностных слоях контактирующих тел, активацией поверхностных слоев контактирующих тел и рядом других явлений (электрических, акустических и т.д.). Наибольший интерес представляют для нас процессы изнашивания, нагрева и активирования контактирующих поверхностей.

**Изнашивание.** Это процесс отделение материала с поверхности твердого тела при трении и увеличения его остаточной деформации. Результатом изнашивания, определяемым в установленных единицах (длины, массы, объема и др.), является *износ*. Износ является причиной выхода из строя более 80% деталей машин и механизмов. Порой, даже незначительный износ является причиной потери работоспособности машин. Так, при потере одного килограмма массы вследствие износа автомобиля весом 1000 кг, он уже подлежит ремонту. Процесс изнашивания характеризуется **интенсивностью изнашивания**, т.е. отношением значения износа к интервалу времени, в который он изработан.

В зависимости от материалов трущихся тел, их геометрии, различных технологических факторов, геометрии контакта трущихся тел, режимов нагружения, окружающей среды и т.д., могут осуществляться различные типы изнашивания, классифицируемые по характеру воздействия на поверхности трения и протекающих в ней процессов при эксплуатации деталей машин. Различают три группы видов изнашивания: **механическое, коррозионно-механическое** (механо-химическое) **и молекулярно-механическое**. Рассмотрим подробнее некоторые виды изнашивания.

1. **Абразивное изнашивание** – это механическое изнашивание, которое происходит вследствие режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц, находящихся в закрепленном или свободном состоянии. Абразивное действие осуществляют абразивные частицы, более твердые, чем изнашиваемый материал (пыль, проникающая в трущиеся сопряжения из окружающей среды, выкрашивающиеся твердые частицы оксидов и карбидов металлов и т.д.), микровыступы более твердой сопряженной поверхности и т.д. Если абразивное действие осуществляется в результате действия твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа, то такой вид изнашивания называется **гидроабразивным (газоабразивным)**. Характер абразивного действия зависит от твердости абразивных частиц и изнашиваемого материала, от формы этих частиц и меняется от микрорезания, т.е. определения продуктов износа в виде стружки за один проход, до отделения этих продуктов в виде крупинки или чешуек, вследствие многократного упруго-пластического деформирования поверхностей притупленными абразивными частицами.

- 2. Усталостное изнашивание** – это механическое изнашивание, возникающее в результате усталостного разрушения после многократного повторного деформирования микрообъемов материала поверхностного слоя трущихся тел. Встречается как при трении скольжения, так и при трении качения, а также может быть составляющим других видов изнашивания (например, абразивного). Процесс имеет скрытый (латентный) период, в течение которого происходит накопление повреждений внутри материала, а только затем наступает отделение частиц износа различной формы (например, чешуек). Типичный пример этого износа – питтинг (выкрашивание), возникающий при трении качения в подшипниках качения, опорно-поворотных кругах, катках и т.д.
- 3. Изнашивание при схватывании (заедании)** – это молекулярно-механическое изнашивание, возникающее в результате схватывания, т.е. локального соединения двух твердых тел вследствие действия молекулярных сил, последующего глубинного вырывания материала с одной детали и переноса его на другую. Имеет место при разрыве смазывающей пленки, разделяющей трущиеся тела, при сухом трении и т.д. При скольжении на локальных участках контакта может распространяться на всю площадь контакта (лавинное распространение заедания), вызывающее глубинное вырывание материала, задиры и заедание узла трения вплоть до сваривания контактирующих тел. В зарубежной литературе этот вид изнашивания называют тяжелым видом адгезионного изнашивания (в отличие от мягкого адгезионного изнашивания).
- 4. Координационно-механическое изнашивание** - это группа видов изнашивания, протекающих в той или иной активной среде, которая в результате химического или электрохимического взаимодействия с поверхностными слоями трущихся поверхностей образует на них слои продуктов этого взаимодействия, механически разрушаемые в процессе трения и вновь возобновляемые при контакте со средой. Может быть достаточно интенсивным, например, в присутствии сероводорода, и оказывать значительное влияние на долговечность деталей машин. В том случае, когда химически активным компонентом среды является кислород (например кислород, растворенный в смазочной среде), то такой вид изнашивания называется окислительным.
- 5. Изнашивание при фреттинг- коррозии** – это такой вид коррозионно-механического изнашивания соприкасающихся тел при вибрации в коррозионной среде. В результате имеет место усталостное изнашивание поверхностных слоев материала, их окисление, абразивное изнашивание твердыми продуктами окисления (поскольку продукты изнашивания узлов трения, подверженных этому виду изнашивания, не удаляются из контакта) при взаимном интенсифицировании этих (и других) видов изнашивания.

**6. Водородное изнашивание** – это явление разрушения поверхностного слоя контактирующих тел водородом, выделяющимся из смазочных материалов, топлив и неметаллических материалов вследствие разложения в процессе трибохимических реакций, который диффундирует в поверхностный слой материала и вызывает охрупчивание. Наблюдается в насосах, перекачивающих нефтепродукты, водородсодержащие продукты, при трении по полимерсодержащим тормозным колодкам и т.д. Изнашивание в зависимости от режима процесса трения, вида изнашивания, окружающей среды может быть **нормальным** (установившимся) и **патологическим** (интенсивным). Переход от нормального к патологическому процессу характеризуется резким повышением коэффициента трения, ростом интенсивности изнашивания (табл. 1) и заметным огрублением поверхности (ростом размеров поверхностных микронеровностей).

Поэтому путем оптимизации конструкции узла трения, рациональным выбором материалов трущихся деталей и технологии их изготовления, а также правильным назначением смазочных материалов, следует не допустить перехода к патологическим видам изнашивания (например, к интенсивному абразивному или коррозионно-механическому изнашиванию и тем более – к изнашиванию при схватывании).

Таблица 1  
**Характеристики нормального и патологического трибологических процессов (по Б.И. Костецкому)**

Характеристика	Нормальное трение	Патологические процессы
Коэффициент трения	0,005-0,15	0,3-0,4
Износ (мкм на 1000 м пути)	Менее 0,01	100 и более
Максимальная высота неровности $R_{max}$ -мкм	0,1-1,2	Более 100

При постоянных условиях нагружения процесс изнашивания проходит три стадии:

- 1) **приработка**, в течение которой параметры шероховатости и волнистости изнашиваемых тел изменяются до установления оптимального, воспроизводимого в дальнейшем уровня, а коэффициент трения и интенсивность изнашивания также меняются (снижаются) до установленных значений, не изменяющихся в дальнейшем;
- 2) **установившееся изнашивание**, при котором воспроизводятся значения указанных факторов;

- 3) **катастрофическое изнашивание**, когда значение некоторого предельного износа превышено и начинается интенсивное изнашивание, приводящее к выходу из строя узла трения (рис. 3)

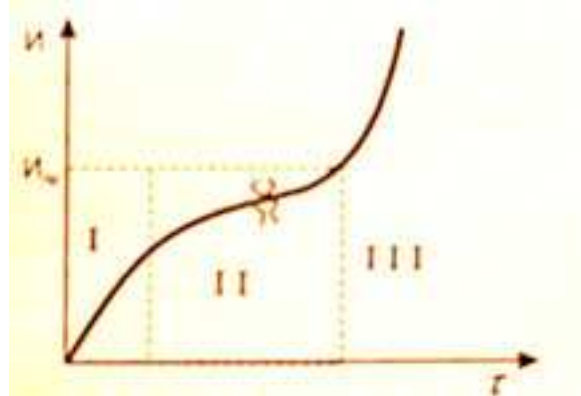


Рис 3. Зависимость износа (I) трущихся тел от продолжительности (τ) процесса изнашивания: I – стадия приработки; II – стадия установившегося изнашивания; III – стадия катастрофического изнашивания

**Фрикционный разогрев трущихся тел.** Значительная часть сил трения выделяется в виде тепла. На микроплощадках фактического контакта при этом генерируются кратковременные «температурные вспышки», достигающие 1000°С. За счет теплопроводности выделившееся тепло частично отводится вглубь тела, а частично затрачивается на нагрев окружающей среды, (например, слоя масла).

В твердых телах создается определенный температурный градиент, так что объемная температура тела отличается от температуры на отдельных участках физического контакта. Фрикционный подъем температуры, в свою очередь, оказывает на фрикционное поведение твердых тел, вызывая разупрочнение их поверхностных слоев, повышение их склонности к схватыванию при совместном пластическом деформировании и образование фрикционных связей между трущимися поверхностями, стимулируя разрушение смазочных слоев, разделяющих трущиеся тела, и переход к патологическим видам изнашивания. В двигателе внутреннего сгорания при перегреве может возникнуть задир зеркала цилиндра, выплавление подшипника скольжения, схватывание с последующей поломкой и т.д. Объемную температуру трущихся деталей оценивают экспериментально, установившуюся величину нагрева  $\Delta T$  (в °С) для стационарного источника фрикционного нагрева и равномерного распределения теплового потока рассчитывают, используя уравнение типа:

$$\Delta T = \frac{fNVR}{\lambda A}$$

где: f – коэффициент трения;

- N – нормальная нагрузка на узел трения;
- V – скорость относительного перемещения трущихся тел;
- R – радиус единичного пятна контакта;
- $\lambda$  – приведенная теплопроводность трущихся тел;
- A – фактическая площадь контакта.

**Активация поверхностей при трении.** Основным активирующим фактором при трении выступают упругопластические деформации поверхностных слоев контактирующих тел в трибологическом процессе. Работа сил трения в основном затрачивается на генерирование теплоты, являющейся мощным активирующим фактором, и на структурные превращения в поверхностных слоях металла, приводящим к измельчению их структуры вплоть до аморфизации, увеличению в поверхностных слоях различных дефектов в результате искажения и частичного разрушения кристаллических решеток, к образованию в поверхностных слоях микротрещин и обнажению участков ювенильной поверхности металла, приводящих, в свою очередь, к эмиссии электронов (электронов низкой энергии) и электронов высоких энергий, оказывающих большое влияние на процессы происходящие в зоне трения. Наклеп отдельных участков трущихся поверхностей обуславливает их гетерогенность, а отсюда и протекание электрохимических процессов. Резко интенсифицируются диффузионные процессы. Оксиды металлов и, особенно свежееобнажающийся в процессе изнашивания металл, оказывает каталитическое воздействие на химические превращения в зоне трения (так называемый трибокатализ). Вследствие этого каталитические реакции и адсорбционно – десорбционные процессы при трении значительно отличаются от аналогичных статических термически активируемых процессов. В зоне трения протекают такие химические реакции, которые в статических условиях характеризуются более высокими энергиями активации и требуют значительно более высоких температур. Во многих случаях в статических условиях такие реакции маловероятны и даже термодинамически невозможны (так называемые трибохимические реакции). Такие реакции играют особую роль при трении в режиме граничной смазки.

**Смазка.** Наиболее распространенным и доступным методом снижения потерь на трение в машинах и механизмах, увеличения их долговечности и надежности является использование **смазочных материалов**. Смазочные материалы – это продукты органического или неорганического происхождения, которые наносят на поверхность трения. (процесс смазки) для уменьшения силы трения и интенсивности изнашивания. Смазка, при которой осуществляется полное разделение трущихся поверхностей сопряженных деталей



жидким смазочным материалом, называется **жидкостной**. При ее реализации полностью исключен непосредственный контакт трущихся тел, а внешнее трение этих тел заменяется много меньшим внутренним трением смазочной среды, разделяющей эти тела.

Условия реализации жидкостной смазки – существование слоя смазочного материала, толщина которого при прилагаемых нагрузках превышает суммарную высоту микронеровностей сопряженных поверхностей. Этот слой может быть образован путем поступления жидкости в зазор под внешним давлением. В этом случае имеет место **гидростатическая смазка**, которую осуществляют например в опорах и направляющих металлорежущих станков. Но в большинстве узлов трения жидкостная смазка, обеспечивающая полное разделение работающих поверхностей контактирующих деталей в процессе эксплуатации осуществляется под действием давления, самовозбуждаемого в слое жидкости, ограниченном этими поверхностями, при их относительном перемещении. Для возбуждения этого давления необходимо, чтобы указанный слой жидкости имел клиновидную форму, обеспечиваемую формой зазора между телами. При достаточной скорости относительного перемещения и обеспечении указанной геометрии в слое развивается давление, обеспечивающее несущую способность смазочному слою. Такой режим смазки называется **гидродинамическим**.

Разделение контактирующих поверхностей и устранение (или, по крайней мере, локализацию) металлического контакта обеспечивают граничные слои, образующиеся на поверхностях трения в результате взаимодействия активных компонентов смазочного материала с поверхностными слоями трущихся тел. Такой режим смазки называется **граничным**. Коэффициенты трения при граничной смазке, как правило, существенно выше, чем при гидродинамической. При граничной смазке имеет место изнашивание трущихся тел. Поэтому в узлах трения механизмов и машин стремятся обеспечить режим жидкостной смазки (чаще всего гидродинамической), когда малы потери на трение, а износ практически отсутствует. Области реализации гидродинамической и граничной смазки в смазываемых узлах трения скольжения определяют диаграммы Герси – Штрибека (рис. 4), представляющей собой зависимость коэффициента трения  $f$  от безразмерного критерия нагруженности, называемого обычно числом Зоммерфельда  $Z$

$$Z = \frac{\eta \cdot V}{P_{\text{пог}}} ;$$

где:  $V$  – скорость относительного перемещения тел;

$P_{\text{пог}}$  - погонная нагрузка (т.е. нагрузка, отнесенная к длине сопряжения);

$\dot{\eta}$  – динамическая вязкость.

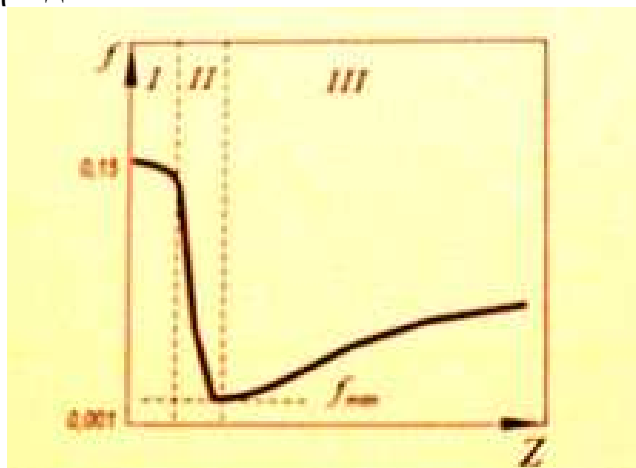


Рис. 4 Диаграмма Герси – Штрибека (зависимость коэффициента трения  $f$  от критерия  $Z$ .

зоны смазки: I – граничной; II – смешанной; III - гидродинамической

Между областями реализации граничной и гидродинамической смазки лежит область реализации смешанной смазки, когда на одних участках контакта реализуется жидкостная смазка, а на других – граничная, причем по мере увеличения величины критерия  $Z$  возрастает доля гидродинамической смазки. Этот режим смазки наиболее часто наблюдается в смазанных узлах трения. Тем не менее, подбором вязкости смазочного материала и оптимизацией конструкции узла трения следует стремиться расширить диапазон применения жидкостной смазки. Следует также иметь в виду, что масла, имеющие высокую вязкость, с одной стороны, обеспечивают высокую несущую способность, а, с другой стороны, заметно повышают потери энергии на трение в слое жидкости.

**Смазочное действие** компонентов топлив, смазочных материалов и присадок наиболее полно проявляется при трении в режиме граничной смазки. Оно состоит в образовании на поверхности трения тонкого слоя продуктов взаимодействия (физико-химического, коллоидно-химического, химического) активных компонентов смазочного материала с материалом поверхностного слоя трущихся тел. Этот слой предотвращает (или минимизирует) непосредственный металлический контакт сопряженных деталей, приводящих к интенсивному изнашиванию этих деталей и к заеданию узла трения. Иначе говоря, активные компоненты смазочного материала, активированные в процессе трения в результате изменения физической адсорбции, хемосорбции или химической реакции, образуют на поверхностях трения граничный слой, обеспечивающий

пассивирование (частичное или полное) активированных в процессе трения поверхностей, экранирует силовое поле твердых тел и, тем самым, обеспечивает снижение коэффициента трения (по сравнению с трением без смазочного материала) и умеренный износ.

Продуктами износа могут быть как продукты взаимодействия металла со смазочным материалом, так и частицы самого металла, поскольку имеет место контакт по вершинам отдельных неровностей. На других участках происходит контакт металлических поверхностей через модифицированный слой продуктов химических реакций. Остальная часть контакта покрыта адсорбированным слоем молекул смазочного материала. В самом общем случае коэффициент трения  $f$  в режиме граничной смазки может быть оценен из уравнения:

$$f = f_m \cdot \alpha + f_{\text{хм}} \cdot \beta + f_1 \cdot [1 - (\alpha + \beta)];$$

где:  $f_m$   $f_{\text{хм}}$   $f_1$  коэффициенты трения соответственно на участках металлического контакта, контакта через слой продуктов химической реакции (модифицированный слой), контакта через адсорбированный слой (как моно, так и полимолекулярный);

$\alpha$  – доля металлического контакта;

$\beta$  – доля поверхности контакта, покрытой модифицированным слоем.

Таким образом, для того чтобы обеспечить минимальные потери на трение, необходимо максимально уменьшить величину  $\alpha$ , вплоть до полного устранения металлического контакта. При умеренных режимах трения молекулы смазочного материала могут обеспечить достаточную прочность граничного слоя и достаточно малое значение  $\alpha$ , вплоть до устранения металлического контакта и образования полимолекулярного граничного слоя на всей площади граничного контакта (поскольку химически активные компоненты в чистых маслах отсутствуют, здесь  $\beta=0$ ). При ужесточении режима трения возросшие нагрузки приводят к уменьшению толщины граничного слоя, увеличению доли металлического контакта, так что коэффициент трения возрастает. Это увеличивает фрикционный разогрев, и эффективность смазочного слоя снижается. Поэтому при жестких режимах граничной смазки в смазочный материал добавляют присадки, повышающие его смазывающую способность. Такие присадки бывают двух типов – поверхностно активные и химически активные. Поверхностно активные присадки (например, высшие жирные кислоты, мыла этих кислот, амины и т.д.) обеспечивают увеличение прочности граничного слоя, его несущей способности, препятствуя выдавливанию молекул смазочной среды из контакта. Причем длинноцепные молекулы ПАВ, обеспечивают утолщение смазочного слоя, что ведет к более полному разделению трущихся поверхностей, более полному экранированию силовых полей этих поверхностей и, тем самым, к снижению адгезионной составляющей

силы трения. Однако ПАВ обеспечивают эффективное смазочное действие лишь в достаточно узком интервале температур и нагрузок.

В смазочные материалы, работающие в жестких условиях, добавляют химически активные присадки, представляющие собой малорастворимые соединения, включающие такие химические компоненты, как сера, фосфор, хлор и азот или их сочетания. Более подробно химический состав присадок описан ниже в этой главе. Молекулы этих соединений при достижении жестких режимов трения разлагаются, выделяя химически активные агенты. Они вступают в химическое взаимодействие с молекулами поверхностно активного слоя контактирующих тел, образуя на поверхности трения модифицированные слои продуктов взаимодействия металлов с активными компонентами этих смазок. Указанные слои покрывают поверхности фактического контакта трущихся тел слоем, достаточно толстым (обычно, десятки молекулярных слоев), чтобы надежно разделить контактирующие поверхности, так что изнашивание металла заменяется изнашиванием этих модифицированных слоев, постоянно восстанавливаемых по мере изнашивания.

Образование граничных слоев на поверхностях трения происходит в процессе взаимодействия трущихся тел со смазочной средой, сопровождающейся трибоактивизацией этих поверхностей и механоактивацией компонентов смазочных сред. Основными факторами, активирующими процессы поверхностных взаимодействий при трении, являются механически активируемая электронная эмиссия, каталитическое влияние свежееобнаженной поверхности металла, фрикционный подъем температуры и высокие контактные давления.

## **2. Устройство маслосистем**

Маслосистема ГТД объединяет в себе системы смазки и суфлирования. В некоторых двигателях в ее состав входят также гидравлические устройства, использующие масло, как рабочую жидкость.

### **Типы маслосистем**

По способу использования масла различают циркуляционные маслосистемы с однократной подачей масла к потребителям (разомкнутые).

В разомкнутой системе масло после прокачки через потребителя удаляют из двигателя, выводя в камеру сгорания или выходное устройство. Вместо насосной подачи масла в них часто используют вытеснительную. Такие системы весьма просты, имеют минимально возможное число элементов и

малый вес, однако отличаются большим расходом масла. Поэтому их главным образом применяют в ГТД однократного действия.

В циркуляционных системах масло используют многократно. После прокачки через двигатель и восстановления свойств (охлаждения, очистки) его вновь подводят к потребителям. Системы смазки такого типа имеют малый расход масла, в связи с чем получили основное применение в ГТД. По характеру циркуляции масла относительно двигателя и маслобака эти системы подразделяют на замкнутые и короткозамкнутые. В замкнутых системах, (которые иногда называют нормально замкнутыми), циркуляция масла происходит через бак, после прокачки через потребителей оно поступает в бак с последующим возвратом в двигатель. В короткозамкнутых системах основное количество масла циркулирует через двигатель, минуя бак, из которого происходит восполнение циркулирующего контура с помощью специального подкачивающего маслонасоса (насоса подпитки), подводящего масло к нагнетательному насосу с повышенным давлением и обеспечивающего, вследствие этого, увеличение высотности системы. Благодаря более короткому циркуляционному контуру, в короткозамкнутых системах прогрев масла в начале работы ГТД происходит быстрее, чем в замкнутых, что особенно важно для маслосистем большой емкости (свойственных обычно для ТВД). Однако по сравнению с замкнутыми системами короткозамкнутые сложнее и имеют больший вес.

В зависимости от избыточного давления в системе суфлирования различают маслосистемы открытого и закрытого типов. В открытых системах масляные полости двигателя и воздушная полость маслобака, объединенные системой суфлирования сообщают с атмосферой, а в закрытых системах указанные полости наддувают, поддерживая в них постоянное избыточное давление небольшой величины с целью увеличения высотности системы, достигаемой снижением интенсивности кавитации масла на входе в нагнетающий и откачивающий насосы.

### Структура циркуляционных маслосистем

Данные системы независимо от их разновидностей имеют три характерных магистрали – подпитки, нагнетания и откачки (образующие циркуляционную систему смазки двигателя) – и дополнены системой суфлирования.

Магистраль подпитки служит для подвода необходимого количества масла из бака к нагнетательному насосу. Чтобы высотность системы смазки была по возможности наибольшей, давление масла на входе в нагнетающий насос при его работе не должно быть чрезмерно низким (ниже 0,04...0,06 Мпа), когда из масла происходит выделение пузырьков воздуха, т.е. возникает кавитация. Для создания необходимого статического давления перед нагнетающим насосом бак располагают возможно выше относительно насоса, а в закрытых маслосистемах

его воздушную полость надувают. В магистрали подпитки короткозамкнутых систем устанавливают подкачивающий насос, редукционный клапан которого поддерживает постоянное давление масла перед нагнетающим насосом в пределах 0,06-0,08 МПа, что обеспечивает автоматическое восполнение циркуляционного контура системы и существенно увеличивает высотность.

Магистраль нагнетания обеспечивает подвод масла к потребителям под давлением 0,35-0,5 МПа. Такой диапазон давлений определен опытным путем и является оптимальным для маслосистем ГТД. При давлении масла меньше 0,35 МПа трубопроводы магистрали нагнетания необходимо выполнять увеличенного диаметра, что приведет к возрастанию веса маслосистемы. При давлении больше 0,5 МПа возможно существенное увеличение гидродинамического нагрева потребителей от высокоскоростной струи масла из форсунок.

В состав магистрали нагнетания входят следующие элементы:

1. Нагнетающий насос с редукционным клапаном, автоматически поддерживающим заданное давление масла в магистрали. Производительность насоса в расчетных условиях (на земле) принимают в 1,5-2,5 раза выше потребной прокачки масла через двигатель, чтобы с увеличением высоты полета не происходило снижение фактической прокачки масла из-за уменьшения производительности насоса. Избыточное количество масла, подаваемого насосом на малых высотах, редукционный клапан перепускает с выхода из насоса на его вход и за счет этого поддерживает постоянное давление в магистрали нагнетания на всех высотах полета;
2. Запорный (или обратный) клапан, препятствующий перетеканию масла из бака в систему при неработающем двигателе. Пружина запорного клапана удерживает его в закрытом положении при давлении масла не превышающем 0,02-0,05 МПа. В начале работы двигателя клапан открывается давлением, создаваемым нагнетающим насосом;
3. Основной маслофильтр тонкой очистки с перепускным клапаном, который в случае засорения фильтра и возрастании, вследствие этого, перепада давления на нем, перепускает масло в двигатель, минуя фильтрующий элемент. Натяжение пружины перепускного клапана регулируют таким образом, чтобы перепуск масла происходил при повышении перепада давления на фильтре до 0,13-0,16 МПа;
4. Дополнительные фильтры грубой очистки, установленные перед масляными форсунками и предохраняющие их от засорения крупными посторонними частицами в случае засорения или разрыва сеток основного фильтра;
5. Масляные форсунки потребителей, обеспечивающие струйную подачу масла на наиболее нагруженные поверхности трения;
6. Датчики систем измерения и сигнализации параметров масла на входе в двигатель;

7. Трубопроводы, соединяющие элементы магистрали между собой. Диаметры трубопроводов подбирают из условия, чтобы скорость движения в них не превышала 3,0 м/с.

Магистраль откачки необходима для отвода отработанного масла от потребителей и восстановления его свойств – отделения воздушно-масляной смеси, фильтрации и охлаждения. В зависимости от типа маслосистемы магистраль откачки обеспечивает подвод масла в бак или на вход в нагнетающий маслосос. Данная магистраль содержит следующие элементы:

1. Маслосборники, в которые стекает масло от потребителей. Их размещают в нижних полостях корпусов опор, переходных корпусов ТРДД, лобовых картеров ТВД, на нижних коробках приводов агрегатов и т.п. В маслосборниках часто устанавливают пеногасящие и фильтрующие сетки;
2. Откачивающие маслососы, выводящие масло из маслосборников. Число откачивающих насосов и маслосборников принимают не меньше числа опор двигателя. Это необходимо для того, чтобы не допустить возможного в случае применения одного общего насоса скопления масла в отдельных подшипниках ротора из-за различной прокачки масла через них. Такое скопление может вызвать сильный перегрев подшипников и выброс масла через уплотнения опор. Суммарная производительность откачивающих насосов должна быть в 2-3 раза выше, чем производительность нагнетающего насоса, чтобы они могли поддерживать маслосборники сухими при увеличенном объеме отработанного масла в результате его нагрева, вспенивания и насыщения воздухом. Принцип «сухого маслосборника» должен быть реализован при любых эволюциях воздушного судна и высоты полета. Выполнение вышеотмеченных требований обеспечивает возможность непрерывной прокачки свежего масла через потребители маслосистемы и их надежного охлаждения при всех условиях эксплуатации;
3. Воздухоотделитель, который выделяет из вспененного откачиваемого масла воздушно-масляную смесь (смесь воздуха и других газов с частицами распыленного и испаренного масла). Чистое масло поступает из воздухоотделителя к другим элементам магистрали откачки (фильтру, маслорадиатору), а воздушно-масляная смесь отводится либо к центробежному суфлеру системы суфлирования, либо в бак для подогрева имеющегося в нем масла (последнее характерно главным образом для короткозамкнутых систем). Для короткозамкнутых систем наличие воздухоотделителя в магистрали откачки обязательно, т.к. в данных системах отсутствует возможность отстоя масла в баке, а подача к

нагнетающему насосу вспененного масла недопустима из-за его склонности к кавитации. Основное применение для них получили приводные центробежные воздухоотделители, которые иногда используют и в замкнутых системах с целью уменьшения пенообразования в баке;

4. Фильтр, очищающий масло от продуктов износа деталей двигателя и других механических примесей. На этом фильтре часто устанавливают перепускной клапан, обеспечивающий перепуск масла помимо фильтрующих элементов при их засорении, сигнализатор перепада давления или стружкосигнализатор;
5. Радиатор, необходимый для охлаждения масла. В ТРД и ТРДД обычно применяют топливомасляные радиаторы (ТМР), а в ТВД – воздушно-масляные радиаторы (ВМР). На радиаторах устанавливают перепускные клапаны, которые при увеличении давления масла перед ними до предельно допустимого значения (0,2-0,3 МПа) перепускают его по параллельному обводному каналу. Повышение давления масла перед радиатором возможно при запуске двигателя в условиях низких температур, когда радиатор имеет повышенное сопротивление из-за большой вязкости холодного масла. Применение перепускных клапанов предохраняет радиаторы от разрушения повышенными давлениями и позволяет быстрее прогреть масло в двигателе при запуске. В ТМР некоторых ГТД применяют так называемые термостатические клапаны, которые предотвращают большой нагрев топлива путем его перепуска мимо ТМР при возрастании температуры топлива до 80-90°С;
6. Датчики систем измерения и сигнализации параметров масла на выходе из двигателя;
7. Трубопроводы, соединяющие элементы магистрали между собой.

Система суфлирования служит для поддержаний в масляных полостях двигателя и воздушной полости бака определенного избыточного давления путем удаления воздуха, а также для обеспечения заданных перепадов давлений между надуваемыми воздухом предмасляными полостями уплотнений и масляными полостями опор. Суфлирование указанных полостей следует понимать, как сообщение их с атмосферой каким-либо способом, за счет чего достигаются отмеченные цели.

При работе двигателя в масляных полостях опор, коробок приводов агрегатов, редуктора и других, возможно повышение давления за счет постоянного проникновения воздуха через надуваемые маслоуплотнения опор или понижении давления из-за отсасывания воздуха откачивающими насосами, имеющие большие запасы производительности. Чрезмерно высокое давление в



масляных полостях двигателя может стать причиной выброса масла через маслоуплотнения опор и его повышенного расхода. При низких давлениях в этих полостях возможно увеличение пенообразования и ухудшение откачки масла вследствие кавитации. Поэтому все масляные полости двигателя сообщают при помощи суфлера с атмосферой или наружным контуром ТРДД, что позволяет создать оптимальный избыток давления в них над атмосферным (в открытых маслосистемах  $p_{изб} = 0$ , а в закрытых – 0,02-0,04 МПа). Воздушную полость маслобака, в которой тоже нужно стабилизировать давление, обычно соединяют с суфлируемыми полостями двигателя или сообщают с атмосферой отдельным суфлером.

Суфлер, соединяющий полости суфлирования с атмосферой, выделяет из подведенной к нему под действием избыточного давления воздушно-масляной смеси воздух и другие газы, выпуская их в атмосферу (обычно через выходное устройство двигателя) и возвращая в систему смазки выделенное из указанной смеси масло. Основное применение в системах суфлирования получили центробежные суфлеры, обеспечивающие существенное уменьшение расхода масла за счет его почти полного возврата в циркуляционный контур маслосистемы.

В предмасляные полости опор двигателя обычно подводят воздух от компрессора для наддува уплотнений масляных полостей подшипников. Эффективность наддува зависит от перепадов давления воздуха между предмасляными и масляными полостями. При малых перепадах давления или их отсутствии будет происходить выброс масла через уплотнение опор, а при чрезмерно больших возможен сдув масла с подшипников потоком воздуха, проникающего в масляные полости. Регулирование рассматриваемых перепадов давления осуществляют путем суфлирования предмасляных полостей опор, сообщая их с атмосферой специальными трубопроводами, через которые происходит частичный сброс воздуха, подведенного на наддув уплотнений, и выброс утечек масла, чтобы они не попадали в тракт двигателя. Количество сбрасываемого воздуха определяют подбором сечения жиклеров, устанавливаемых в трубопроводы суфлирования.

Таким образом систему суфлирования можно разделить на две функциональные группы, одна из которых предназначена для суфлирования масляных полостей двигателя и воздушной полости бака, а вторая обеспечивает суфлирование предмасляных полостей опор.

## **2.1 Типичные схемы циркуляционных систем**

Схема замкнутой системы смазки, соответствующая требованиям ГОСТ 2.704-76, ГОСТ 2.782-68, приведены на рис.5.

Магистраль подпитки данной системы включает в себя маслобак Б с заливной горловиной ГЗ, фильтрующей сеткой ФС, и сливным краном К, а также трубопровод подвода масла к нагнетающему насосу. Магистраль подпитки оснащена системой измерения уровня масла в баке Н/П (уровнемером

поплавкового типа). Возможно также применение сигнализатора уровня масла в баке, который обычно осуществляет сигнализацию трех характерных уровней: минимального, нормального и максимального. Такие сигнализаторы необходимы в случае применения системы централизованной заправки ГТД маслом. Системы измерения и сигнализации уровня масла в баке позволяют контролировать в эксплуатации важный диагностический параметр маслосистем – расход масла, с помощью которого можно установить течь в трубопроводах, выброс масла через уплотнения или суфлер и т.п.

Магистраль нагнетания содержит следующие элементы:

Нагнетающий насос НН с редукционным клапаном КР; обратный клапан КО, выполняющий функции запорного клапана; основной масляный фильтр тонкой очистки ФО с перепускным клапаном КП; дополнительные фильтры ФД, установленные перед масляными форсунками подшипников опор. В данной магистрали предусмотрено измерение температуры  $t_{вх}$  /П и давления  $p_{вх}$  /П масла на входе в двигатель, а также установлен сигнализатор перепада давления на фильтре  $\Delta p/c_r$  с помощью которого можно обнаружить засорение фильтра. Измерение температуры масла  $t_{вх}$  позволяет контролировать работу маслорадиатора, а по величине давления  $p_{вх}$  устанавливается сигнализатор минимального давления масла на входе в двигатель, повышающий эффективность контроля нагнетателя.

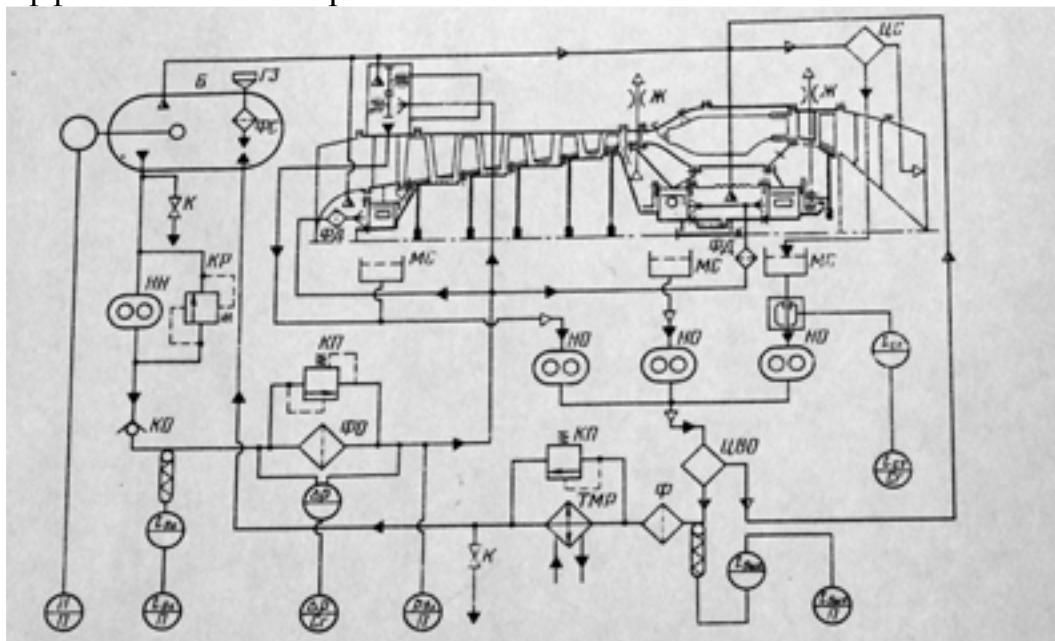


Рис. 5 Схема маслосистемы замкнутого типа.

Б- бак; ГЗ-заливная горловина; ФС-фильтрующая сетка; К-кран; РР-нагнетательный насос; КР-редукционный клапан; КО-обратный клапан; ФО-основной фильтр; КП-перепускной клапан; ФД-дополнительный фильтр; МС-маслосборники; НО-откачивающие насосы; ЦВО-центробежный воздухоотделитель; Ф-фильтр; ТМР-топливомасляный радиатор; ЦС-центробежный суфлер; Ж-жиклер; Н/П,  $t_{вх}$  /П,  $p_{вх}$  /П,  $t_{вых}$  /П – системы измерения уровня масла в баке Н; температуры  $t_{вх}$  и давления  $p_{вх}$  масла на входе в двигатель, температуры масла  $t_{вых}$  на выходе из двигателя;  $\Delta p/c_r$  – сигнализатор перепада давления на фильтре;  $t_{ст}/C_r$  - термостружкосигнализатор.

В магистрали откачки рассматриваемой схемы ( рис. 5 ) установлены маслосборники МС, откачивающие насосы НО, воздухоотделитель ЦВО, фильтр Ф, топливомасляный радиатор ТМР с перепускным клапаном КП и сливным краном К, термостружкосигнализатор  $t_{ст}/C_r$  на линии откачки масла от подшипника передней опоры турбины, измеритель температуры масла на выходе из двигателя  $t_{вых}$  /П. Откачиваемое масло содержит ценную информацию, позволяющую оценивать техническое состояние находящихся с ним в контакте деталей двигателя. Оно выводит из двигателя продукты износа деталей, испытывает перегрев от узлов трения в случае их повреждений, приводящих к повышенному внутреннему тепловыделению. Отмеченные обстоятельства учитывают, устанавливая в магистралях откачки для контроля загрязнения масла продуктами износа фильтры-стружкоанализаторы, магнитные пробки, термостружкосигнализаторы. Основным элементом системы суфлирования в приведенной на рисунке маслосистеме является центробежный суфлер ЦС, который сообщает с атмосферой масляные полости двигателя и воздушную полость бака и выделяет масло из подведенной к нему воздушно-масляной смеси с возвратом масла в циркуляционный контур (в магистраль откачки). Суфлирование предмасляных полостей средней и задней опор двигателя осуществляется путем сообщения этих полостей с атмосферой трубопроводами через жиклеры Ж, стравливающих подведенный на наддув маслоуплотнения воздух. Предварительно подобранные проходные сечения жиклеров обеспечивают оптимальные перепады давления между предмасляными и масляными полостями.

### **3. Условия работы авиационных масел**

Смазочные масла по роду исходного сырья подразделяются на минеральные и синтетические. С развитием авиационного двигателестроения повысились тепловые напряжения, скорости движения и нагрузки на трущиеся детали двигателей. Масло в двигателе подвергается воздействию высоких температур, каталитическому влиянию конструкционных материалов, из которых состоит двигатель и смазываемые агрегаты, большим давлениям, окислительному действию кислорода воздуха. Условия работы масла значительно меняются в зависимости от типа двигателя, его конструктивных особенностей. В некоторых случаях для смазки одного и того же двигателя, работающего в различных климатических условиях, требуются различные по качеству масла. Для различных типов авиационных двигателей, а также для агрегатов и приборов требуются прежде всего масла различной вязкости. Вязкость обычно является основным определяющим показателем классификации масел.

По целевому назначению авиационные масла делятся на следующие группы:

1. Масла для авиационных турбореактивных двигателей, маловязкие, с низкой температурой застывания;

2. Масла для авиационных турбовинтовых двигателей, мало- и средневязкие, с низкой температурой застывания и высокой смазывающей способностью;
3. Масла для поршневых авиационных двигателей, высоковязкие, подвергнутые глубокой очистке;
4. Масла для редукторов вертолетов (трансмиссионные масла), высоко-и средневязкие, с хорошей смазывающей способностью;

Агрегатные и приборные масла, маловязкие, подвергнутые глубокой очистке, с низкой температурой застывания.

### **3.1 Общие требования к маслам**

Прежде всего масло должно обеспечивать хорошую смазку трущихся деталей и предотвращать их износ. Желательно чтобы даже при кратковременных нарушениях жидкостного режима смазки (пусковой период и период остановки) масло хорошо защищало от износа трущиеся детали. Масло в любых условиях эксплуатации должно надежно подаваться к трущимся и охлаждаемым деталям двигателя, агрегата или прибора.

При длительной работе масло должно сохранять свои свойства и не давать отложений на деталях, т.к. отложения способствуют перегреву и загрязнению двигателя, агрегата или прибора. Масло не должно вызывать коррозии деталей и призвано защищать детали от внешних коррозионных факторов. Необходимо, чтобы масла имели невысокую стоимость и длительный ресурс работы. Одним из важнейших требований к маслам является нетоксичность и малая огнеопасность.

Исходя из этих требований желательно, чтобы масла имели следующие свойства:

- возможно меньшую вязкость, но достаточную для создания надежного жидкостного слоя в зазорах при максимальной рабочей температуре;
- резкое возрастание вязкости с повышением давления;
- пологую вязкостно-температурную характеристику;
- низкую температуру застывания;
- хорошую смазывающую способность и высокую нагрузочную прочность пленки;
- отсутствие нестабильных составных частей, выделяющихся в виде отложений в двигателе;
- отсутствие коррозионно-активных примесей и химически нестабильных составных частей, склонных к превращению в коррозионно-активные вещества;
- высокую температуру вспышки, характеризующую стойкость против испарения и выгорания при работе двигателя, а также низкую огнеопасность масла;
- физическую однородность (отсутствие механических примесей и воды).

Масла, полностью удовлетворяющие всем названным требованиям, получить практически нельзя, т.к. ряд требований противоречат друг другу. Поэтому подбор масла для конкретного двигателя ведут таким образом, чтобы оно по своим основным показателям наиболее полно отвечало требованиям для этого двигателя

### **3.2 Основные сведения о производстве масел**

Исходя из требований, изложенных выше, производители масел разрабатывают схемы и рецептуры их производства, включающие следующие процессы:

- производство базовых масел из нефтяного сырья или синтетические основы;
- производство функциональных присадок, обеспечивающих основные требования по эксплуатации масел и создание оптимальных пакетов присадок, обладающих наилучшими характеристиками при их смешении со специально подобранными базовыми маслами;
- производства по смешению (блендингу) базовых масел с пакетами присадок, предназначенных для выпуска основного ассортимента товарной продукции, соответствующей требованиям нормативных документов (ГОСТов, ТУ, спецификаций) и допущенных к применению в конкретных типах двигателях, агрегатах и приборах.

### **3.3 Получение основ нефтяных масел**

**Базовые масла обычных технологий** получают из одного или смеси нескольких минеральных компонентов (дистиллятных, остаточных), прошедших обработку по классической схеме: селективная очистка или экстракция растворителями – депарафинизация растворителями – очистка адсорбентами. Использование обычных технологий позволяет получить базовые масла со свойствами, достаточными для производства на их основе моторных масел начального уровня качества. В зависимости от химического состава используемой в качестве сырья нефти, различают два типа базовых масел обычных технологий – парафиновые и нафтеновые.

Исходным сырьем для получения базовых масел служат мазуты (остатки от прямой перегонки нефти). Основным способом переработки мазута по масляной схеме является фракционная перегонка. При этом из более легкокипящих фракций мазута получают дистиллятные базовые масла (БМ).

После отгона из мазута масляных дистиллятов в остатке получают гудрон или при менее глубоком отборе - полугудрон. Гудроны и полугудроны используют для получения высоковязких, так называемых остаточных БМ.

Мазуты выкипают в широком интервале температур, причем температура кипения при атмосферном давлении большинства масляных фракций лежит выше температуры их разложения (крекинга). Поэтому фракционную перегонку мазута проводят при пониженном давлении в присутствии водяного пара.

На рис 6. показана схема вакуумной установки. Мазут сырьевым насосом прокачивается через теплообменники 9 и 11, нагревается в них за счет тепла отходящих дистиллятов и гудрона и затем прокачивается через трубчатую печь 4, откуда с температурой 420°C попадает в ректификационную колонну 3. Колонна представляет собой высокий стальной цилиндр с теплоизоляцией, которые изнутри оборудованы специальные горизонтальные перегородки (так называемые тарелки) с отверстиями, а иногда, особой конструкции колпачки, обеспечивающие многократный контакт жидкости и пара в противотоке перемещающимися по длине колонны. Схема работы ректификационной тарельчатой колонны приведена на рис 7.

За счет этих многократных контактов обеспечивается оптимальное фракционирование смеси, позволяющее выделить из нее на определенных уровнях по высоте колонны узких фракций нефтепродуктов с заранее известными свойствами. Здесь мазут разделяется на отдельные фракции, масляные дистилляты с различной вязкостью.

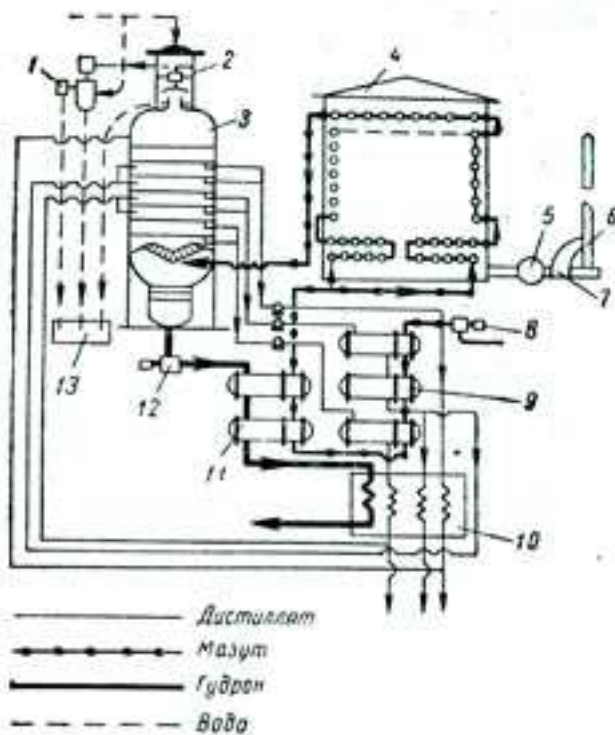


Рис 6. Схема вакуумной установки

- 1- эжектор; 2- барометрический конденсатор; 3 – ректификационная колонна; 4 – печь; 5 – вентилятор; 6 – дымовая труба; 7 – подогреватель воздуха; 8 – сырьевой насос; 9 – дистиллятные теплообменники; 10 – холодильник; 11 – мазутные теплообменники; 12 – насос; 13 – колодец

. С низа колонны отбирают полугудрон и гудрон. В вакуумных трубчатых установках мазут нагревается без разложения до 425°C. Это достигается за счет непродолжительного пребывания мазута в трубчатых печах и вакуума 250-350 мм рт.ст.

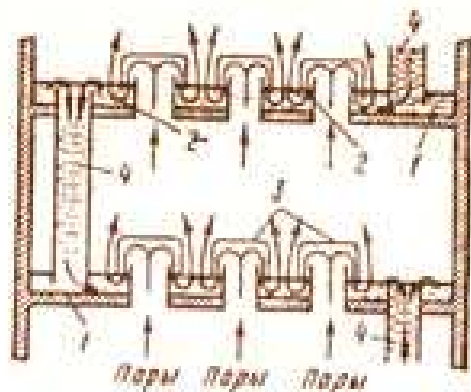


Рис 7 Схема работы ректификационной колонны  
 1-тарелка (полка); 2-трубки для прохода паров; 3-колпачки; 4-переточник

С повышением температуры нагревания и испарения мазута (в условиях, исключающих возможность его разложения) увеличивается глубина отбора из него масляных дистиллятов, особенно за счет вязких углеводородов.

Полученные путем перегонки мазута масляные дистилляты и остатки состоят из смеси углеводородов различных классов и содержат сернистые соединения. К их числу относятся асфальто-смолистые вещества, нафтеновые кислоты, ароматические углеводороды и др.

Масляные дистилляты и остатки являются полупродуктами для получения товарных БМ. Чтобы получить готовые масла, необходимо освободить их от вредных примесей. Наиболее простым способом очистки масляных дистиллятов является выщелачивание, т.е. обработка растворами щелочей для удаления кислых соединений.

Лучшие результаты дает кислотно-щелочная очистка, которая заключается в обработке масляного полупродукта концентрированной серной кислотой (96-98%), а затем щелочью. При этом происходит отделение асфальто-смолистых веществ, части нафтеновых кислот и тяжелых полиароматических углеводородов, склонных к сульфированию, которые при высокой температуре вступают в реакцию с серной кислотой и удаляются из масла. Затем эти полупродукты обрабатываются натриевой щелочью, которая нейтрализует органические кислоты и остатки серной кислоты. Для удаления остатка щелочи и солей часто используют сушку масла горячим воздухом. Кислотно-щелочным способом многие годы проводилась очистка дистиллятных масел.

Наряду с кислотной очисткой при получении вязких остаточных БМ, широко использовалась очистка с применением мелкоизмельченной белой глины. При контакте с горячим маслом глина адсорбирует на своей поверхности асфальто-смолистые вещества, остатки серной кислоты и кислого гудрона. После этого глину отделяют с помощью фильтров. Очистка масла с обработкой серной кислотой и отбеливающей глиной путем

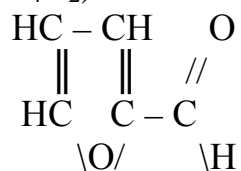
контактного фильтрования носит название кислотно-контактной очистки. Однако сегодня, по соображениям экологической безопасности, от этого способа очистки БМ практически полностью отказались.

При переработке мазутов, содержащих значительное количество полициклических ароматических углеводородов с большим количеством бензольных колец и короткими алифатическими цепями в молекулах, легко окисляющихся и ухудшающих вязкостно-температурные характеристики товарных масел, описанные выше способы очистки оказываются недостаточными. Поэтому с ростом потребления БМ и необходимостью перерабатывать мазуты не только отборных масляных нефтей, ресурсы которых в последнее время исчерпались, но и менее качественных, получила распространение селективная очистка, т.е. очистка с применением селективных (избирательных) растворителей. Этот метод очистки основан на подборе растворителей, обладающих при определенной температуре и соотношении количества растворителя и очищаемого масла разной растворяющей способностью к нежелательным и полезным компонентам БМ.

При отстаивании смеси БМ с растворителем, она расслаивается на рафинатный слой, состоящий из масла, из которого удалены нежелательные компоненты (рафинат), и экстрактного слоя, представляющего собой раствор удаленных из масла компонентов (экстракта) в растворителе.

После селективной очистки, а иногда также и перед ней производят дополнительную контактную очистку масла. В качестве селективных растворителей долгие годы использовали фурфурол, фенол, нитробензол.

**Фурфурол** ( $C_5H_4O_2$ ) имеет следующую структурную формулу:



Он обладает хорошей селективностью, но ограниченной растворяющей способностью, вследствие чего его применяют в относительно большом количестве (до 150 – 400%) к очищаемому маслу.

Фурфурол – бесцветная жидкость с приятным запахом хлеба; ядовит; плотность при  $25^\circ\text{C}$  –  $1,155 \text{ г/см}^3$ , температура кипения  $161,7^\circ\text{C}$ .

**Фенол** ( $C_6H_5\text{OH}$ ) имеет следующую структурную формулу:



Фенол – бесцветное кристаллическое вещество, с температурой плавления  $40,9^\circ\text{C}$  и температурой кипения  $181,75^\circ\text{C}$ . Плотность фенола при



41°C – 1,05 г/см<sup>3</sup>. Фенол имеет характерный запах, обладает несколько меньшей селективностью, чем фурфурол, но хорошей растворяющей способностью. При фенольной очистке значительно (на 30-50%) снижается содержание серы в масле.

**Нитробензол** - C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>NO<sub>2</sub> имеет следующую структурную формулу:

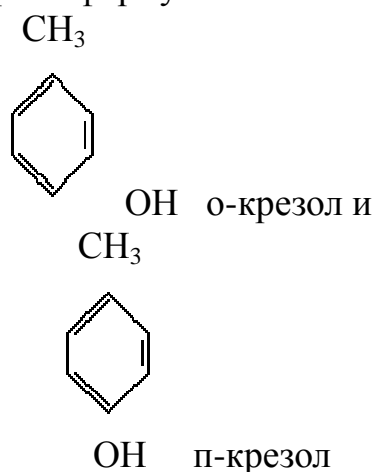


Нитробензол принадлежит к числу эффективных селективных растворителей. Отличается высокой токсичностью. Температура кипения 211°C, температура плавления 5,76°C, плотность при 15°C - 1,2 г/см<sup>3</sup>.

Для получения высококачественных вязких светлых остаточных масел применяют селективную очистку парными растворителями, из которых один селективно растворяет компоненты, подлежащие удалению, а другой - полезные компоненты масла.

Таким способом обеспечивается очень четкая хорошая очистка. В качестве растворителей при этом применяют технический **крезол** представляющий смесь о-крезола с п-крезолом

Структурная формула

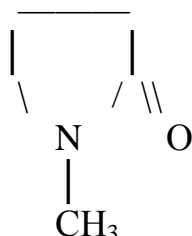


Используется, в частности, смесь крезолов с 30-50% фенола и технического пропана (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). Процесс проводят при повышенном давлении (до 2,0 мПа). Рафинат дочищают отбеливающей глиной.

В последние годы получил широкое распространение новый процесс селективной очистки БМ с применением в качестве селективного реагента N-метилпирролидон. Он обладает большой растворяющей способностью к ароматическим углеводородам, но недостаточно селективен. При смешении его с другими специально подобранными растворителями, имеющими близкую температуру кипения, можно получить смесь, обладающую, наряду с хорошей растворяющей способностью, высокой селективностью. В

качестве второго такого растворителя в промышленности используют этиленгликоль. Для повышения селективности к смеси добавляют 5-15% (масс.) воды.

**N-метилпирролидон** имеет следующую структурную формулу:



N-метилпирролидон: температура плавления  $-24^{\circ}\text{C}$ , температура кипения  $202^{\circ}\text{C}$ ; плотность при  $20^{\circ}\text{C}$   $0,8089 \text{ г/см}^3$  смешивается с водой и органическими растворителями. Основным преимуществом его применения в качестве селективного растворителя – малая токсичность и отсутствие экологически вредных побочных продуктов процесса. В настоящее время все новые технологические установки получения БМ строятся и эксплуатируются преимущественно с применением последнего в качестве селективного растворителя.

При производстве БМ из минерального сырья по **новейшим технологиям** применяют метод **гидроочистки**. Процессы гидропереработки могут заменить частично или полностью классические методы обработки нефтяного сырья. Минеральные компоненты, получаемые при использовании этих процессов называются гидропроцессингами. Качество гидропроцессинговых БМ зависит от совершенства и глубины процессов нефтепереработки. На этом основании следует различать гидроочищенные и гидрокрекинговые БМ.

**Гидроочистка** - каталитический метод очистки вакуумного газойля. Процесс гидроочистки применяют при облагораживании компонентов смазочных масел типа NEXBASE и VHVI базовых масел с повышенным индексом вязкости (базовые масла второй группы) и парафинов с целью снижения содержания серы. Гидроочистка проводится при температуре  $380-420^{\circ}\text{C}$  и давлении водорода  $2,5 - 4,0 \text{ мПа}$  в присутствии алюмокобальтмолибденовых (АКМ) или алюмоникельмолибденовых (АНМ) катализаторов. При этом гидрируются непредельные соединения в предельные, а соединения, содержащие кислород и серу, - в воду и сероводород. В этом процессе при использовании специальных катализаторов достигается высокая степень гидрирования ароматических соединений и изомеризация n-парафинов в изопарафины.

**Каталитический гидрокрекинг** и последующая **гидроизомеризация** являются наиболее сложными гидрогенизационными процессами, позволяющими получить гидрокрекинговые БМ, приближающиеся по своим свойствам к синтетическим. По этой причине некоторые производители называют такие масла **гидросинтетическими**.

### 3.4 Синтетические базовые масла

За рубежом и в России происходит постепенный процесс увеличения выпуска БМ на синтетической основе для удовлетворения возрастающих требований потребителей к товарным маслам. При этом при разработке новых поршневых и турбовитовых двигателей разработчики ограничивают возможности применения традиционных минеральных БМ и товарных продуктов,

До 2003 года маслопроизводители успешно частично или полностью замещали синтетические компоненты гидрокрекингowymi, разрабатывая новые составы моторных и трансмиссионных масел.

Но, несмотря на совершенствование технологий производства высококачественных гидросинтетических масел, существуют и расширяются области применения, в которых уровень их отдельных свойств оказывается недостаточным так для эксплуатации современных ТРД, применимы исключительно синтетические основы.

Увеличение доли маловязких компонентов, используемых при производстве моторных масел, выявляет еще один существенный недостаток гидрокрекингowych масел – относительно высокую летучесть, в сравнении с маслами, полученными из синтетических компонентов. По прогнозам зарубежных производителей синтетических масел спрос на эту продукцию будет расти.

**Синтетические базовые масла** представляют собой маслообразные жидкости – полимеры или олигомеры, полученные методом синтеза из различных мономеров. Свойства синтетических жидкостей зависят от химического строения, которое является основным критерием их классификации:

- углеводородные масла на основе полиальфаолефинов, изопарафинов или алкилбензола;
- диэфирные масла на базе двухосновных кислот и одноатомных спиртов;
- полиэфирные масла на основе эфиров полиолов, полигликолевых эфиров или эфиров фосфорной кислоты;
- фторуглеводородные масла;
- силиконовые масла.

Отдельные свойства исключают возможность применения некоторых синтетических жидкостей в качестве основных компонентов моторных масел:

- *полиэфирные масла на основе эфиров фосфорной кислоты* имеют недостаточные индексы вязкости (в пределах от 0 до -30);
- *фторуглеводородные масла* имеют низкую температуру кипения и плохие вязкостно-температурные характеристики;

- *силиконовые масла* не смешиваются с минеральными и обладают недостаточными смазывающими и противоизносными свойствами.

**Полиальфаолефины ( ПАО)** являются углеводородными синтетическими жидкостями. В промышленных объемах их получают путем синтеза молекул децена в олигомеры или полимеры с короткими цепями.

Высокие индексы вязкости позволяют использовать масла на основе полиальфаолефинов в широком диапазоне температур. Отсутствие примесей соединений серы и металлов обеспечивает высокие антикоррозионные свойства. Хорошая смешиваемость с минеральными маслами позволяет использовать полиальфаолефины в качестве синтетического компонента, применяемого при производстве полусинтетических масел.

Благодаря невысокой стоимости в сравнении с другими синтетическими полиальфаолефиновые масла являются наиболее широко используемыми в мире синтетическими маслами. Несмотря на то, что в последние годы гидрокрекингные масла приблизились по качеству и за счет более низких цен отвоевали значительную долю рынка базовых масел, ранее принадлежавшую полиальфаолефиновым, последние все еще обладают рядом существенных преимуществ:

- очень низкие температуры застывания (в связи с отсутствием линейных парафинов);
- высокие термостабильность и стойкость к окислению (отсутствие ненасыщенных углеводородов);
- малая летучесть и коксуемость, обеспечиваемые однородностью состава.

Эти преимущества особенно важны, в связи с увеличивающимся потреблением маловязких моторных масел, рассчитанных на удлиненные интервалы замены. К недостаткам полиальфаолефиновых масел следует отнести:

- худшую, по сравнению с минеральными маслами, растворяющую способность по отношению к некоторым типам присадок;
- худшую совместимость с эластомерами (вызывают усадку резиновых уплотнений с потерей их эластичности).

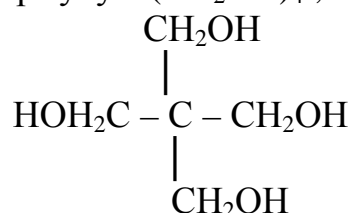
Оба эти недостатка устраняют путем добавления небольших количеств сложных эфиров. К сожалению, в настоящее время, отечественная промышленность лишь разворачивает законсервированные ранее мощности по производству полиальфаолефинов на нижекамском нефтехимическом комбинате. Производителям масел в России, в основном, приходится пользоваться импортными продуктами названного класса. Остается надеяться на, то, что в ближайшем будущем от этой порочной практики отечественные производители авиационных масел откажутся, перейдя на отечественные продукты

**Диэфиры** получают при взаимодействии двухосновных кислот с одноатомными спиртами или одноосновных кислот с многоатомными спиртами. Диэфиры имеют более разнообразную структуру, чем ПАО.

Они обладают хорошей смешиваемостью с минеральными маслами. В сравнении с минеральными, масла на базе диэфиров обладают более высокими индексами вязкости и термостабильностью, более низкими температурами застывания, меньшей летучестью и огнеопасностью. Высокая растворяющая способность позволяет растворять лаки и шлам, поддерживая чистоту деталей двигателя. На практике, диэфирные масла способны удалять в двигателе отложения, образовавшиеся в результате использования других масел.

Недостатком диэфирных синтетических масел является их повышенная агрессивность в отношении натуральных и синтетических резинотехнических изделий. Они вызывают набухание и размягчение резиновых прокладок, сальников и т.п. По этой причине их следует использовать с химически инертными уплотнительными материалами.

В качестве основы для производства синтетических авиационных масел нашел широкое применение эфир пентаэритрита (ПЭТ). Пентаэритрит получают взаимодействием формальдегида с ацетальдегидом в присутствии  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Имеет формулу  $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$ ;

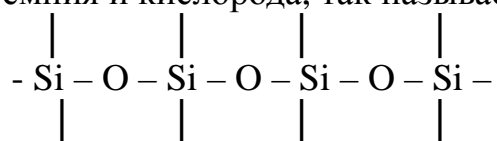


В результате реакции этерификации с синтетическими жирными кислотами  $\text{C}_5 - \text{C}_9$  получают эфир пентаэритрита, обладающий хорошими высокотемпературными свойствами. Масла на его основе успешно выдерживают температуру до  $200^\circ\text{C}$  без изменения своих физико-химических характеристик.

### 3.5 Кремнийорганические соединения.

Одним из важных классов органических соединений, нашедших в последние десятилетия широкое использование в качестве специальных смазочных масел и жидкостей в авиатехнике стали полимерные кремнийорганические соединения.

В отличие от природных нефтяных масел, состоящих из углеводородов - соединений, у которых молекулярная цепь образована из атомов углерода, полисилоксаны имеют в своей основе цепочку из чередующихся атомов кремния и кислорода, так называемую силоксановую группировку:



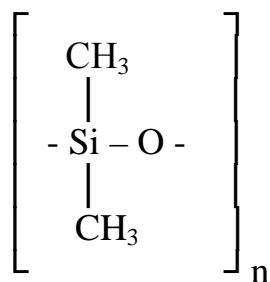
К атомам кремния в виде боковых цепей присоединены углеводородные и другие органические радикалы различного строения. В зависимости от длины молекулярных цепей, строения и состава боковых цепей, полисилоксаны имеют различные физические и химические свойства.

Отличительными свойствами многих кремнийорганических продуктов являются их устойчивость к высоким температурам и окислению, сопротивляемость к действию влаги и хорошие вязкостно-температурные свойства. Кремнийорганические соединения занимают первое место среди других синтетических жидкостей по вязкостно-температурным характеристикам.

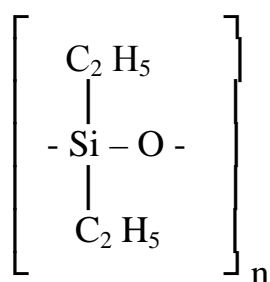
Хорошая термостойкость кремнийорганических соединений позволяет использовать их в качестве теплоносителей в условиях длительной эксплуатации при 350°C.

Кремнийорганические соединения могут быть основой для получения синтетических смазочных масел, работоспособных при высоких температурах, характерных для мощных реактивных двигателей.

Практическое значение в качестве смазочных масел и жидкостей получили полимеры с метильными и этильными радикалами. Первые отвечают общей формуле :



и называются метилсилоксанами или метилсиликонами, вторые отвечают общей формуле:



и называются этилсилоксанами или этилсиликонами. Известны также фенилполисилоксановые соединения, содержащие в боковой цепи фенильные радикалы, смешанные алкиларилполисилоксаны, например, метилфенил- и этилфенилполисилоксаны.

Полисилоксаны представляют собой бесцветные прозрачные маслянистые жидкости различной вязкости. Они хорошо растворяются в углеводородах и не растворяются в воде, спиртах и других полярных растворителях.

Свойства полисилоксанов в значительной степени определяются свойствами силоксановой группировки. Связь кремния с кислородом отличается большей термической стабильностью, чем органических полимеров, что определяется большей энергией образования связи Si – O, которая составляет 89 ккал/моль, а энергия связи C – C 58,6 ккал/моль. Энергия связи Si – C ( 57 ккал/моль) близка к энергии связи C – C.

Термическая деструкция полисилоксанов связана главным образом, с отщеплением боковых органических радикалов, причем основная полимерная цепь полисилоксанов при этом не разрушается. Было показано, что окисление органического радикала влечет за собой образование кислородных мостиков между молекулами полимеров, которые затрудняют доступ кислорода к другим органическим радикалам, и дальнейшее окисление полимера затрудняется. Полисилоксаны отличаются большой химической инертностью, что также объясняется устойчивостью связи Si – O. На них не действуют многие агрессивные реагенты (азотная кислота, серная кислота и др.) Полисилоксановые масла практически не корродируют сталь, чугун, медь, латунь, алюминий, свинец, бронзу магний, олово и другие металлы при нагревании до 150°C.

Очень низкая температура застывания полисилоксанов и малая зависимость вязкости от температуры объясняется малой полярностью этих соединений и, следовательно, малыми силами межмолекулярного взаимодействия, намного меньшими, чем даже у такого молекулярного полимера, как полиизобутилен.

Значительная механическая прочность связи Si – O обуславливает высокую сопротивляемость к механическому разрушению полисилоксанов при работе под большими нагрузками и при высоких скоростях сдвига. Химическая инертность и слабая полярность полисилоксанов обуславливают их плохие противоизносные свойства при граничном трении. Полисилоксаны по противоизносным свойствам уступают минеральным маслам, что является основным недостатком полисилоксанов как смазочных масел.

Полисилоксаны обычно применяют там, где требуется высокая химическая и термическая стабильность, хорошие вязкостно-температурные свойства и не предъявляются высокие требования к смазывающей способности масла.

Полисилоксаны как в чистом виде, так и в смеси с минеральными основами применяются для передачи давления в различных гидросистемах и в качестве рабочей жидкости в гидравлических амортизаторах, а также при изготовлении консистентных смазок и приборных масел.

Еще одним важным направлением применения силоксановых жидкостей является использование их в качестве антипенных присадок к широкому ассортименту масел, т.к при их работе иногда наблюдается вспенивание моторного масла в двигателе, что препятствует его нормальной работе. Например, пена может заполнить картер и выбиваться наружу через уплотнения. Это приводит к понижению уровня масла, в результате чего смазываемый механизм может выйти из строя, а иногда, сопряжено с пожарной опасностью. Пенообразование при циркуляционной системе смазки нарушает

возможность прокачивания масла по маслопроводу и подаче его к смазываемым поверхностям равномерной струей. Насыщенное воздухом масло быстрее окисляется и неспособно обеспечить смазку при граничном трении. В гидравлических системах вспенивание масла также нарушает режим их работы.

Пенообразование возникает вследствие энергичного перемешивания масла с растворенным и диспергированным в нем воздухом, на образование пены существенное влияние оказывают также температура и содержание влаги, вязкость и плотность масла. Чем тяжелее масло, тем больше его склонность к пенообразованию. Это объясняется тем, что тяжелые масла обладают свойством удерживать пузырьки газа и таким образом сохранять устойчивость пены. Стабильность пены зависит от прочности пленок, образуемых вязкими маслами вокруг пузырьков газа; поэтому масла, содержащие некоторые ПАВ (к которым относятся также моющие и антиокислительные присадки) более склонны к пенообразованию, чем чистые масла.

В качестве противопенных присадок широко используются полиметилсилоксан (ПМС-200А), полидиметилсилоксан, полиэтилсилоксан и др.

Силоксановые жидкости эффективны как пеногасители в значительно более низких концентрациях, чем обычные органические пеногасители и, обычно их добавляют в масла в концентрациях от 0,0001 до 0,001%. Эффективность применения таких пеногасителей в сильнощелочной среде значительно снижается. Их существенным преимуществом является полная безвредность для организма человека.

Кроме устранения пенообразования, противопенные присадки способны влиять на физико-химические и эксплуатационные свойства масел. Они снижают давление насыщенных паров, тем самым уменьшая испаряемость масел при высоких температурах, и улучшают их термоокислительную стабильность, вязкостные и смазывающие свойства. При окислении масел, содержащих полисилоксаны, образуется меньше смолистых и кислотных продуктов, увеличивается индукционный период окисления, уменьшается лакообразование и, тем самым, продлевается ресурс работы масел и двигателя.

В последние годы полисилоксаны получили применение не только как добавки, но и как термостойкие смазочные материалы, имеющие торговую марку жидкостей серии 132 -20; 132-21 и др., предназначенных для смазывания подшипников в различных приборах и узлах трения машин, работающих в интервале температур от  $-(65-70)$  до  $+70$  °С. Они представляют собой смесь полиэтилсилоксановой жидкости и минеральных смазочных масел в различных соотношениях.

Как известно, термическая деструкция полисилоксанов начинается при температурах  $250 - 300^{\circ}$  и интенсивно протекает при  $350^{\circ}$ . При этом в основном происходит разрыв связей Si – O с образованием низкомолекулярных циклических продуктов, вызывающих снижение вязкости и увеличение летучести полисилоксанов.



## **4 Присадки к авиационным маслам и механизмы их поведения в составе товарных продуктов**

Для обеспечения нормальной эксплуатации авиадвигателя требуется тщательно подобранное смазочное масло, обеспечивающее нормальную работу узлов и агрегатов на всех режимах эксплуатации двигателя и в разных климатических условиях его использования.

На ранних этапах развития авиационной техники с этими задачами успешно справлялись масляные фракции с подобранными вязкостными характеристиками. По мере роста мощностей двигателей, их форсирования и повышения ресурса работы ужесточились и условия работы масел. К ним стали предъявляться все новые требования, обеспечить которые можно только путем значительных технологических усилий, направленных на совершенствование состава смазочных масел. Эти задачи можно было решать, вводя в масляные композиции особые добавки, называемые присадками, которые способны улучшить те или иные эксплуатационные свойства композиции товарных масел.

К основным требованиям инженеров, эксплуатирующих авиационную технику, можно отнести:

- обеспечение оптимальных вязкостных свойств масел в широком интервале температур, характерных для его надежной эксплуатации;
- улучшенные низкотемпературные свойства масел, обеспечивающие надежную работу двигателя в условиях низких температур окружающей среды;
- термическую стабильность масел в условиях эксплуатации и хранения;
- хорошие антифрикционные свойства масел;
- продление ресурса работы двигателя за счет оптимизации смазывающей способности масел, которая определяет их противоизносные и противозадирные свойства;
- улучшенные антикоррозионные свойства масел;
- для поршневых двигателей обеспечение хороших моющедиспергирующих характеристик масел, снижающих возможность образования отложений на разных узлах двигателя.

### **4.1 Вязкостные свойства масел**

Вязкость масел значительно изменяется с изменением температуры, причем эта зависимость различна для разных по составу масел рис.8.

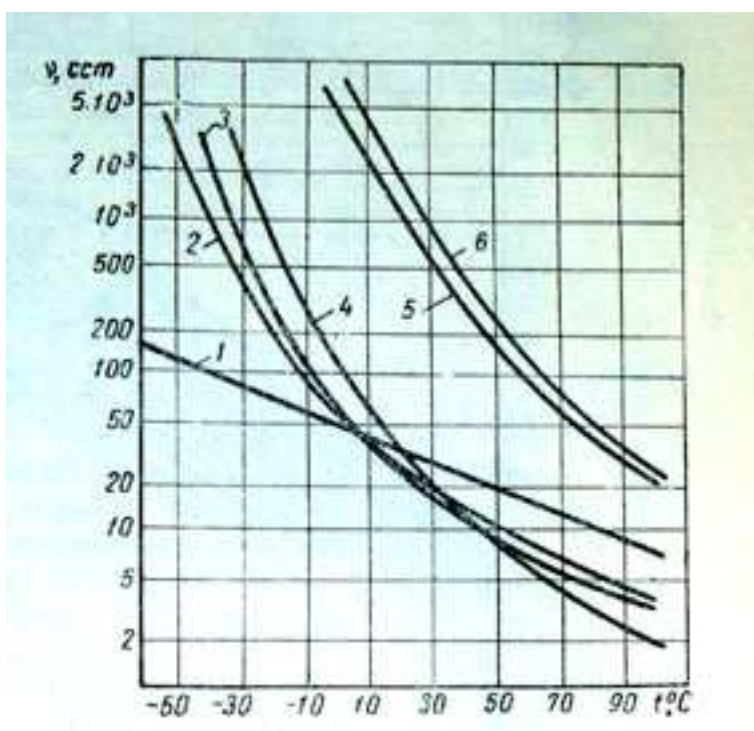


Рис.8 Вязкостно-температурные характеристики масел:

1-диметилсиликон; 2-диэфир; 3-полигликоль; 4-масло МС-8; 5-масло МС-20; 6-масло МК-22

Поскольку вязкость является одним из основных эксплуатационных характеристик масла, то изучение закономерностей изменения вязкости от температуры является весьма важным. Чем меньше масло меняет свою вязкость при изменении температуры или, другими словами, чем более пологая вязкостно-температурная кривая, тем выше качество масла. Это объясняется тем, что масло с пологой кривой вязкости при высоких температурах сохраняет достаточную вязкость для надежной смазки узлов трения двигателя, а при низких температурах вязкость такого масла не настолько велика, чтобы затруднить его запуск и прокачку масла по маслопроводам. В нормативных документах на масла приводятся значения вязкости как минимум при двух температурах и данные о пологости вязкостно-температурной кривой в виде индекса вязкости (ИВ) – эмпирической величине, которая характеризует изменение вязкости при температурах 100° и 40°С. Чем выше значение ИВ, тем меньше меняется вязкость масла с изменением температуры. Так, для базовых масел, выработанным по обычным технологиям, ИВ колеблется в пределах 80-85 ед. Для гидроочищенных БМ он составляет 90-95 ед., для товарных сортов минерального масла – около 100, а для масел, полученных на гидроочищенных основах 100-110. У полусинтетических масел ИВ составляет 110-115, а у синтетических может доходить до 130-145 ед.

С понижением температуры масла его вязкость возрастает. Из-за этого при запуске двигателя в холодное время года затрудняется проворачивание вала двигателя и прокачка масла через маслосистему. Масла, у которых вязкость при

понижении температуры резко повышается, т.е. масла с крутой вязкостно-температурной характеристикой, обладают плохими пусковыми свойствами. Для исправления этого недостатка и улучшения вязкостно-температурных свойств масла применяют специальные загущающие или вязкостные присадки.

В качестве вязкостных присадок в настоящее время используются различные высокомолекулярные соединения, в частности полиизобутилен, который получают методом катионной полимеризации изобутилена в присутствии катализаторов. В промышленном масштабе полиизобутилен производят, осуществляя низкотемпературную полимеризацию изобутилена с молекулярной массой 10 000 – 15 000 в присутствии  $\text{BF}_3$  или  $\text{AlCl}_3$ .

В последние годы стали применять аналогичные полимеры с молекулярной массой 1000 – 3000, которые более устойчивы к деструкции в условиях эксплуатации масла в двигателе. За рубежом полиизобутилен, применяющийся в качестве вязкостной присадки, известен под торговой маркой «опанол» и «эксанол». Широко применяется в качестве вязкостной присадки к моторным маслам 20-37% раствор полиизобутилена в минеральном масле – «паратон».

Добавка полиизобутилена не снижает стабильности против окисления и противокоррозионных свойств масел, не влияет на образование углеродистых отложений и осадков при работе двигателя. Полиизобутилен иногда улучшает противоизносные свойства масел – он адсорбируется на поверхности трущихся деталей и тем самым создает более прочную масляную пленку.

Применение вязкостных присадок определяется в основном, их сырьевой базой. В этом отношении представляют большой интерес сополимеры этилена с пропиленом и продукты их термического разложения - сополимеры этилена с другими  $\alpha$ -олефинами или диенами.

**Механизм действия вязкостных присадок.** Загущенные масла являются растворами высокомолекулярных соединений в дистиллятных маслах. Макромолекулы присадок по размерам в сотни раз превосходят молекулы масла, поэтому растворение полимера в масле приводит к повышению вязкости.

Известно, что загущенные масла при высоких температурах имеют более высокую, а при отрицательных температурах более низкую вязкость по сравнению с обычными (незагущенными) маслами, т.е. сочетают в себе свойства летних и зимних масел. Это объясняется тем, что в холодном масле макромолекулы, будучи свернуты в «клубки», не изменяют его вязкости, а распрямляясь при нагревании, увеличивают вязкость загущенного масла по сравнению с базовым. Применением вязкостных присадок можно повысить вязкость маловязкого масла при основной рабочей температуре до требуемого значения, сохранив пологость вязкостно-температурной кривой, свойственной маловязкому маслу (рис. 9 ).

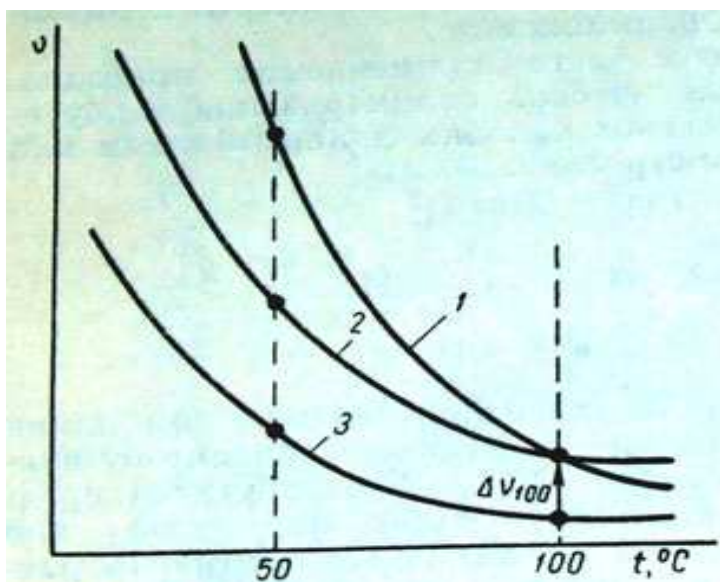
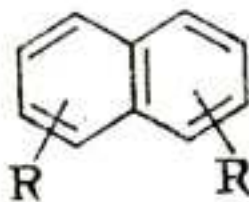
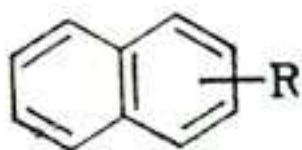


Рис. 9 Влияние загущающей присадки на вязкостно-температурную характеристику масла.

1-натуральное нефтяное масло; 2- загущенное масло при маловязкой основе (точка пересечения кривых 1 и 2 – потребная вязкость при 100°C); 3-масловязкая основа.

Масла не имеют определенной, четко выраженной температуры перехода из жидкого в твердое состояние. Границей перехода условно считают температуру потери текучести масла после охлаждения его в стандартных условиях. Эту температуру называют температурой застывания. Застывание масла может быть связано с двумя различными процессами: постепенное повышение вязкости вплоть до превращения масла в аморфную стекловидную массу или образование кристаллического каркаса из высокоплавких парафиновых углеводородов. При производстве масел из них стараются удалить высокоплавкие парафиновые углеводороды. Кроме того понизить температуру застывания можно специальными **присадками – депрессорами**. Отечественными исследователями в 20х годах прошлого века показали способность высокомолекулярных смолистых веществ понижать температуру застывания масел. В качестве депрессорных присадок предложено использовать широкий круг различных химических веществ, которые при всем их разнообразии имеют некоторые сходные черты – наличие полярных групп или ароматических ядер и длинных алифатических цепей, высокую молекулярную массу (800 – 1000) и хорошую растворимость в минеральных маслах. В качестве депрессоров, рекомендованы алкилпроизводные нафталина и алкилфенолы. Где R – алкил  $C_{24} - C_{30}$ .



Положение алкильных радикалов в этих соединениях окончательно не установлено, т.к. алкилирование нафталина осуществляется хлорированным парафином, представляющим собой смесь высокомолекулярных алкилхлоридов в различных положениях.

Высокоэффективный продукт типа парафлюу (левая формула) был получен при алкилировании нафталина хлорированным церезином. Для остаточных масел в качестве депрессора рекомендуется использовать алкилфенольные соединения с длинными парафиновыми цепями.

В качестве депрессоров возможно применение ряда соединений, синтезированных конденсацией различных алкилфенолов с длинными боковыми цепями (моно и три-алкилфенолов) и триалкил- $\beta$ -нафтола с формальдегидом и 1,2 дихлорэтаном.

**Механизм действия депрессорных присадок** весьма сложен и до конца не изучен. Одни исследователи считают, что твердые углеводороды, кристаллизующиеся из масла, представляют собой смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматического рядов. Большинство углеводородов относится к изоморфным веществам, способным кристаллизоваться вместе, образуя большие смешанные кристаллы. Очевидно, что одна из возможностей образования смешанных кристаллов обусловлена наличием у компонентов длинных углеводородных цепей (в основном нормального строения). Исследования микроструктуры смешанных кристаллов при помощи электронного микроскопа показали, что их форма и, в особенности, их размеры при оптимальных условиях охлаждения зависят от концентрации твердых углеводородов, хотя и относящимся к различным классам углеводородов, но близких по температуре плавления, и от того какой тип углеводородов составляет зародыш будущего кристалла. Существенное влияние на формирование кристаллов имеет вязкость дисперсной среды (масла): чем выше вязкость среды, тем меньше радиус сферы, из которой выделяющиеся молекулы дисперсной фазы (твердых углеводородов) могут достичь зародыша кристалла, т.е. тем вероятнее возникновение новых центров кристаллизации и увеличения числа кристаллов при их малых размерах.

Задолго до появления синтетических депрессоров было отмечено, что некоторые из природных ПАВ типа смол, находящихся в нефтях, препятствуют их застыванию. Исследования показали, что асфальто-смолистые вещества в зависимости от их химического состава обладают двойным действием на процесс кристаллизации парафинов. Нерастворимые в фенолах смолы, в молекулах которых имеются достаточно длинные боковые алифатические цепи, оказывают объемное действие, выражающееся в изменении формы кристаллов в результате внедрения молекул смол в кристаллическую структуру парафинов, а растворимые в феноле смолы проявляют поверхностное действие – они адсорбируются на выделившихся кристаллах и способствуют агломерации кристаллов в неизменном виде.

Механизм действия синтетических депрессоров до настоящего времени подвергается исследованию и обсуждению. Согласно наиболее общему представлению парафлу адсорбируется на кристаллах парафинов, препятствуя их росту, и вытесняет с их поверхности масляный слой.

При изучении алкилароматических углеводородов с разной длиной и различным числом боковых цепей и колец (моно- и диалкилпроизводных бензола, нафталина, антрацена и тетралина) оказалось, что увеличение длины и числа боковых цепей улучшает депрессорные свойства алкилароматических углеводородов. Наиболее эффективными депрессорами оказались дициклоароматические углеводороды с длинными боковыми цепями.

Эффективность депрессорных присадок тесно связана с углеводородным составом масел, содержанием в них смол и степенью их очистки. Для каждого масла существует некоторая оптимальная концентрация твердых углеводородов, ниже и выше которой действие присадки на температуру застывания масла не проявляется. Ароматические углеводороды, особенно асфальто-смолистые вещества, являются антагонистами депрессоров. Наилучшей восприимчивостью к депрессорам обладают парафин-нафтеновые углеводороды масляных дистиллятов. Причем более высокое содержание насыщенных углеводородов нормального строения усиливает влияние присадки.

Таким образом, возможности дальнейшего улучшения низкотемпературных свойств масел с помощью депрессоров зависит как от синтеза новых высокоэффективных присадок, так и от изучения механизма их действия и правильного подбора условий их применения.

## **4.2 Смазывающая способность масел**

В начале данной главы были подробно изложены механизмы и природа трения, возникающие при работе сопряженных пар трения в различных условиях смазки. Ниже излагаются конкретные примеры применения присадок к смазочным маслам уменьшающим трение и износ при работе трущихся тел.

В случаях, когда между трущимися деталями не удается обеспечить жидкостной смазки, износ этих деталей и величина силы трения зависят от свойств масла, которые условно можно назвать смазывающими. Чем лучше смазывающие свойства масла, тем меньше износ и потери на трение, более надежна защита трущихся поверхностей от схватывания и заедания металлов.

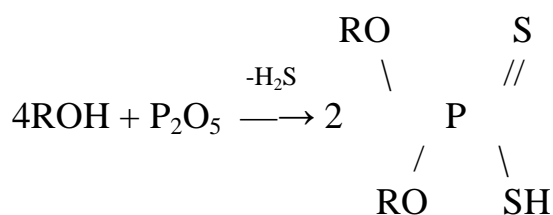
Смазывающая способность масел зависит от целого ряда факторов, но основное влияние оказывают физико-химические свойства углеводородов и присадок, входящих в состав масла.

Смазывающая способность масла должна проявляться в двух положительных качествах масла: во-первых, в его способности предотвращать износ поверхностей трения в условиях устойчивой граничной пленки масел в области окислительного износа, т.е. масло должно обладать противоизносными свойствами; во-вторых, в способности масла отодвигать в сторону больших

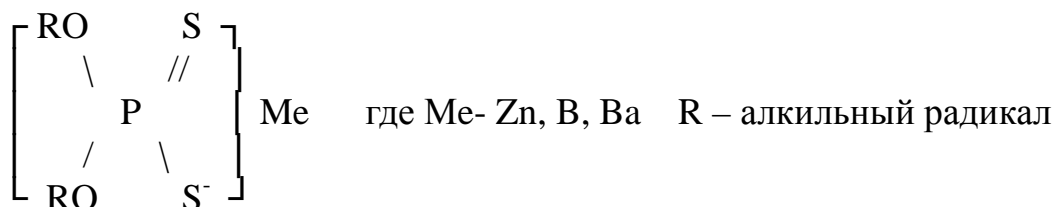
нагрузок, больших скоростей скольжения и больших температур момент разрыва граничной пленки масла и наступления схватывания поверхностей металлов, т.е., масло должно обладать противозадирными свойствами. В ряде случаев масла, обладающие хорошими противозадирными свойствами, не имеют хороших противоизносных свойств и наоборот.

Это объясняется тем, что противозадирные свойства обуславливаются присутствующими в маслах химически активными веществами (в частности, веществами, содержащими S, Cl, P, O)

Среди присадок к маслам наиболее широкое применение нашли соединения, содержащие серу и фосфор в виде производных эфиров дитиофосфорных кислот. В основе получения этих эфиров лежит реакция сульфида фосфора (V) со спиртами, алкилфенолами, аминами, кислотами, т.е. с соединениями, содержащими активный атом водорода:



Среди различных соединений пятивалентного фосфора в качестве противоизносных присадок наибольшее распространение получили диалкилдитиофосфаты металлов, в ряде случаев их рекомендуют для предотвращения питтинга. В состав присадок этого типа входят в основном дитиофосфаты цинка, бора и бария.



К наиболее широко распространенным присадкам такого типа относятся серийно выпускающиеся присадки ВНИИ НП – 360, ВНИИ НП – 354.

При тяжелых режимах трения, когда на трущихся поверхностях металлов развиваются высокие температуры, химически активные элементы, соединяясь с металлом поверхностей трения образуют пленки, которые предотвращают контакт чистых поверхностей металлов и их схватывание. Чем химически активнее смазка, тем лучше ее противозадирные свойства. При легких режимах граничного трения, когда схватывания металла не наблюдается, износ поверхностей происходит в результате образования, последующего разрушения и удаления с поверхностей тончайших пленок – продуктов взаимодействия химически активных элементов масла с материалом поверхностей трения. В

этом случае повышенная химическая активность масел приводит к увеличению скоростей износа.

Понятно, что противоизносные и противозадирные характеристики масла будут меняться при изменении свойств материалов поверхностей трения и свойств среды, так как скорость химических процессов, величина и свойства образующихся поверхностных пленок зависят от химических свойств материала поверхностей трения и свойств газовой среды.

Наиболее распространенным способом оценки смазывающей способности масел является механические испытания на машинах трения. Несмотря на их разнообразие ни одна из них не получила общего признания в качестве стандартного прибора для оценки смазывающей способности масел. Наиболее распространенной машиной для определения этого показателя в условиях больших контактных нагрузок является четырехшариковая машина трения ЧШМ, с помощью которой по ГОСТ 9490, оцениваются основные противоизносные и противозадирные свойства масел (трибологические характеристики), такие как диаметр пятна износа при разных нагрузках на узел трения, критическую нагрузку, которую выдерживает масло, индекс задира и нагрузку сваривания.

### 4.3 Стабильность масел

Во время работы двигателя масло, подвергаясь воздействию высоких температур и кислорода воздуха, претерпевает химические изменения и частично испаряется. На деталях двигателя, соприкасающегося с маслом, откладываются различные углеродистые вещества, а свойства самого масла изменяются.

Стабильностью масла называют его способность сохранять свои свойства и состав при работе в двигателе. Чем стабильнее масло, тем меньше оно дает загрязнений (осадков, лаковых пленок, нагара). Изменение качества масла в работающем двигателе и образование углеродистых отложений, прежде всего, связано с окислением масла. Кислород воздуха, вступая в реакцию с молекулами масла, образует в конечном итоге смолы, асфальтены, карбены и т.д.

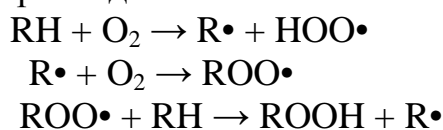
**В высокотемпературной зоне двигателя** (камера сгорания поршневого двигателя) масла разогреваются до температур 350-400°C. При этом, часть масла теряет летучие вещества, обугливается и образует нагар.

Исследование процессов нагарообразования, проведенное К.К. Папок, показало, что качество и расход масла не влияют на нагарообразование при длительной работе двигателя. При установившемся процессе наряду с нагарообразованием идет постепенное выгорание нагара. Скорость выгорания зависит от температурного режима работы двигателя. Чем выше температурный режим, тем тоньше слой нагара.

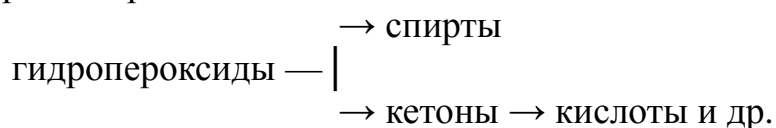


**В среднетемпературной зоне двигателя** (подшипники газовой турбины ТВД, боковые и внутренние стенки поршня в поршневом двигателе и т.д.) масло разогревается до температур 200-300°C и находится в виде тонкой пленки на поверхности металла деталей. При этом происходит частичное испарение масла, а часть масла окисляется и разлагается, образуя твердый осадок – лак. Процесс лакообразования идет непрерывно, интенсивность его растет с ростом температуры. Пленка лака, являясь плохим проводником тепла, приводит к значительному перегреву двигателя и, как следствие этого, к их короблению, заеданию и другим опасным последствиям. Чтобы предохранить двигатель от интенсивного лакообразования, масла очищают от смолистых и других лакообразующих веществ и добавляют антиокислительные и моющедиспергирующие присадки.

**Механизм окисления углеводородов**, входящих в состав масел таков. Все углеводороды, присутствующие в нефтяных маслах под действием кислорода воздуха (особенно при высоких температурах и каталитическом действии конструкционных материалов элементов двигателя) подвергаются окислению с образованием различных продуктов. Для объяснения механизма окислительных процессов, совершающихся под влиянием молекулярного кислорода академиком Н.Н. Семеновым была предложена схема, основанная на цепных вырожденно-разветвленных реакциях. Согласно ей при окислении углеводородов под воздействием молекулярного кислорода образуются свободные радикалы и гидропероксиды:



В дальнейшем свободные радикалы  $\text{R}\cdot$  снова соединяются с кислородом с образованием пероксидных радикалов и т.д. Таким образом, происходит цепной процесс окисления. Образующиеся гидропероксиды распадаются на радикалы (что приводит к вырожденному разветвлению цепей) или превращаются в различные кислородсодержащие соединения по схеме:



Для замедления или предотвращения окисления углеводородов необходимо ввести в реакционную среду такие соединения (ингибиторы окисления), которые могли бы прерывать цепи окисления путем воздействия с образующимися радикалами  $\text{R}\cdot$  или  $\text{ROO}\cdot$  или с гидропероксидами (последние в результате разлагаются). Механизм действия ингибиторов окисления неразрывно связан с цепным механизмом окисления и заключается в том, что ингибиторы  $\text{InH}$  взаимодействуют с радикалами  $\text{ROO}\cdot$  или  $\text{R}\cdot$ , вследствие чего концентрация последних уменьшается, прерывая цепную реакцию; в результате процесс окисления тормозится:



Окисление будет протекать в присутствии ингибитора, хотя и с меньшей скоростью. Чем больше скорость взаимодействия углеводородных радикалов с молекулами ингибиторов, тем эффективнее ингибитор.

Что касается противокоррозийных присадок, можно считать, что их действие сводится к образованию на металле защитных пленок, препятствующих непосредственному воздействию коррозионноактивных веществ на металл. Пленки эти, кроме того, дезактивируют металл как катализатор окисления. Образование пленок является сложным и длительным процессом с большим количеством различных превращений. Характер, скорость и глубина этого процесса зависит от химического состава присадок и металла и от условий их взаимодействия. Например, для присадок содержащих серу, предполагают три типичных направления реакций с металлами: 1) образование соединений типа меркаптидов, тиокислот или их солей; 2) образование сульфидов металлов; 3) образование комплексных соединений металла с присадкой или иные механизмы химического взаимодействия.

В качестве антиокислительных и противокоррозионных присадок к моторным маслам широкое применение получили сложные эфиры фосфорной и серных кислот.

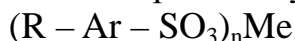
Среди различных соединений пятивалентного фосфора в качестве антиокислительных присадок наибольшее распространение получили диалкилдитиофосфаты металлов.

Для удаления углеродистых отложений в масла вводят моюще-диспергирующие присадки.

**Механизм действия моющих и диспергирующих присадок** сводится в основном к тому, что они переводят нерастворимые в масле вещества в состояние суспензии и удерживают их во взвешенном состоянии, не давая им укрупняться и оседать, а также разрыхляют и смазывают отложения с поверхности деталей. Кроме того, моющие и диспергирующие присадки могут влиять на процессы окисления масел, направляя их в сторону образования соединений, растворимых в масле.

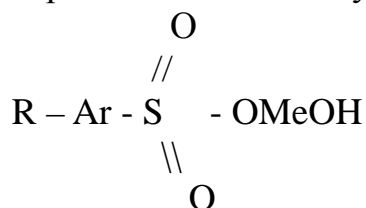
На современном этапе производство моющедиспергирующих присадок для смазывающих составов получило широкое развитие. Одним из основных показателей сульфонатных присадок, характеризующих их детергентно-диспергирующие свойства, являются содержание в них сульфонатов металлов. Согласно современным требованиям сульфонатные присадки должны содержать не менее 28-30% (масс.) активного вещества.

Маслорастворимые сульфонаты делятся на средние, основные и свержосновные. Средние сульфонаты имеют формулу



в основном получают путем нейтрализации сульфированных минеральных масел кислотного характера или соответствующих сульфокислот гидроксидами металлов.

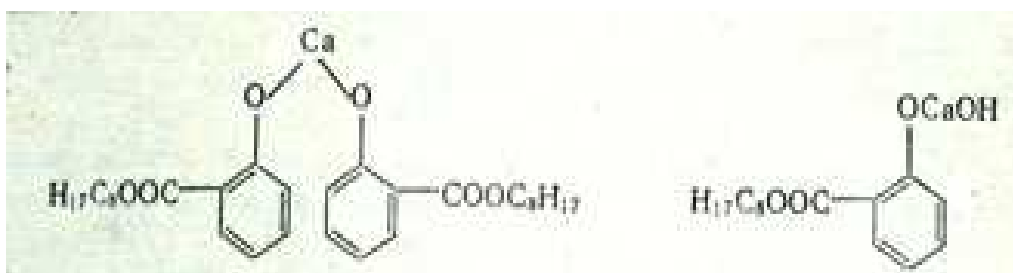
Наиболее распространены основные сульфонаты, отвечающие формуле:



В качестве моющих присадок к моторным маслам применяются соли нафтеновых и жирных кислот, ароматических оксикислот (например салициловой) и др.

К таким присадкам относятся нафтенаты металлов бария, кальция, магния, алюминия, цинка, меди и др. металлов. Благодаря моющим и диспергирующим свойствам, а также высокой стабильности нафтенатов, при их добавлении значительно улучшаются эксплуатационные свойства смазочных масел. Особенно эффективными в этом отношении являются нафтенаты кобальта и бария.

Моющими присадками, действующими одновременно как противокоррозионные, являются кальциевые соли октилового эфира салициловой кислоты:



средний октилсалицилат кальция

основной октилсалицилат кальция

За последние годы широкое распространение получили беззольные полимерные присадки, являющиеся имидпроизводными янтарной кислоты – алкенилсукцинимиды. Отличительной особенностью сукцинимидных присадок является их эффективное моющее и диспергирующее действие, значительно более высокое, чем у моющих присадок других типов.

### 5 Условия работы масел в ТРД

Принципиальной особенностью системы смазки ГТД является то, что масло не соприкасается с зоной горения горючей смеси. В связи с этим, расход масла в ГТД значительно меньше, чем в поршневых и обусловлен только потерями масла через систему суфлирования.

В основных узлах трения ТРД – подшипники качения шариковые и роликовые. Таким образом, основным видом трения в ТРД является трение качения. Коэффициент трения подшипников качения составляет в среднем 0,02 – 0,0004 в то время, как в подшипниках скольжения он может достигать величины 0,01. Следовательно, затраты мощности на преодоление сил трения в ТРД сравнительно невелики. Незначительный пусковой крутящий момент подшипников качения облегчает запуск двигателя при низких температурах.

Подшипники качения требуют небольшого количества смазки и могут надежно работать на маловязких маслах. Подшипники компрессора при работе нагреваются до 100-150°C, а турбины до 150-200°C. После остановки двигателя из-за прекращения циркуляции масла и внешнего обдува температура подшипника может возрасти до 250-270°C, что способствует испарению масла, а также провоцирует лакообразование.

Кроме смазки основных подшипников масло обеспечивает смазку шестеренчатых передач приводов агрегатов, где условия работы масла сравнительно легкие из-за небольших удельных нагрузок и скоростей скольжения.

Масло в ТРД работает в интервале температур от -50-60 до плюс 200-270°C. Оно соприкасается с различными металлами и сплавами, из которых изготовлены детали маслосистемы и двигателя.

При рабочей температуре 120°C испаряемость маловязкого минерального масла в 8-35 раз выше, чем у высоковязких минеральных масел. С ростом скорости полета и мощности двигателя, растут температуры в узлах трения, следовательно, повышаются требования к термической стабильности и испаряемости масел. При рабочих температурах выше 300°C нефтяные минеральные масла должны заменяться синтетическими.

Важным эксплуатационным фактором масел для ТРД является температура воспламенения. Попадая в подшипник турбины, расположенный вблизи горячих узлов двигателя, масло нагревается до высоких температур, что грозит его воспламенением.

Отдельный узел ГТД (передний подшипник, расположенный во входном канале диффузора) напротив, находится в зоне воздействия низких температур (минус 50-60°C). Это делает необходимым учитывать при выборе масла его низкотемпературные свойства (вязкость, прокачиваемость, температуру застывания). Стендовые испытания продемонстрировали существенные недостатки использования минеральных масел в этих узлах трения. Так, через 10 минут работы двигателя при минус 54°C, давление на выходе из масляного насоса приближалось к нулю. Иными словами масло не прокачивалось через маслосистему. Уровень вязкости, при котором начинает нарушаться нормальная прокачиваемость, по опытным данным составляет около 5000 мм<sup>2</sup>/с, а при 20 000 мм<sup>2</sup>/с подача масла в узлы трения практически прекращается. Для товарных минеральных масел минимальной рабочей температурой является минус 35-40°. Синтетические масла работоспособны до температур минус 50-55°C.

При выборе вязкости масла следует помнить, что снижение вязкости масла уменьшает ресурс работы подшипника, поэтому тяжело нагруженные подшипники ГТД работали на маслах с вязкостями, обеспечивающими их надежную смазку. Для современных ГТД, работающих в форсированных режимах, использование минеральных масел весьма нежелательно. Практически все они предусматривают применение синтетических масел,

обеспечивающих бесперебойную длительную надежную работу двигателя в условиях высоких нагрузок и температур. Как правило, в нормативных документах на масла нормируется их кинематическая вязкость при 50°C.

Существенной функцией масла является теплоотвод от горячих узлов двигателя. Так как в современных ТРД расход масла незначительный, в маслосистему заливается небольшое количество масла (5-15 л). Для обеспечения теплосъема с узлов трения масло циркулирует в системе и проходит через двигатель около 100 раз в час. В связи с тем, что масло в системе интенсивно перемешивается с воздухом и пенится, необходимо предъявлять повышенные требования к его термостабильности, вводя необходимые антиокислительные присадки, описанные в предыдущем разделе и антипенные присадки (полисилоксаны) резко снижающие склонность масел к пенообразованию.

## **6 Особенности смазки ТВД**

В турбовинтовом двигателе мощность с вала турбины на воздушный винт передается понижающим редуктором. Шестерни редуктора работают при высоких нагрузках, т.к. передаваемая мощность в современных ТРД может составлять тысячи киловатт. Для работы масла в редукторах ТРД характерны чрезвычайно высокие поверхностные напряжения, возникающие по линии зацепления зубьев, вращающихся шестерен. Вследствие этого наблюдаются повышенные износы шестерен редуктора. Редукторы ТРД в принципе требуют совершенно иных масел, чем подшипники качения; для них нужны вязкие масла с высокой смазывающей способностью. Максимальная нагрузка на зубья шестерни, при которой происходит заедание, зависит от вязкости масла и его смазывающей способности.

В связи с особенностями работы ТВД в качестве смазки часто используют смеси низковязких дистиллятных масел типа МС-8 или трансформаторными с высоковязкими маслами типа МС-20, обладающими хорошей смазывающей способностью в соотношениях от 25 – 75 % дистиллятных и остаточных компонентов до 75 – 25% в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Маслосмесь большей вязкости применяется на ТВД большей мощности. Двигатели, заправленные смесью масел МС-8 и МС-20, разрешается дозаправлять смесью трансформаторного масла и МС-20. При смешении компоненты смеси берутся по объему. Смешение проводится при комнатной температуре с тщательным перемешиванием в течении 20-25 мин.

После окончания перемешивания проверяется правильность изготовления смеси по величине кинематической вязкости при 100°C, которая должна быть в пределах 4-6 мм<sup>2</sup>/с для маловязкой смеси и не менее 10 мм<sup>2</sup>/с для высоковязкой. При отклонении кинематической вязкости маслосмеси от заданной необходимо провести корректировку вязкости.

## **7. Масла для вертолетов**

В вертолетах маслами смазываются двигатели, редукторы трансмиссии и шарниры втулок винтов. В двигателях вертолетов Ми-6 и Ми-8 используются как минеральные, так и синтетические масла. Для смазывания редукторов трансмиссии вертолетов используется широкий ассортимент масел различного назначения, уровень качества которых невысок. Так как маловязкие моторные масла имеют недостаточную смазывающую способность, а высоковязкие нефтяные масла обладают неудовлетворительными низкотемпературными характеристиками, то для смазки редукторов трансмиссий широко применяют смеси масел.

В вертолетах Ми-6 и Ми-8 для летней эксплуатации до температуры минус 10°C используют маслосмеси СМ-11,5 – 75% масс. МС-20 и 25% масс МС-8п. Для зимней эксплуатации – смесь СМ-8 – 50% масс. МС-8п и 50% масс. МС-20.

В редукторах хвостовой трансмиссии вертолетов летом широко применяется масло МС-20 и трансмиссионное масло ТСгип, а зимой из-за плохих низкотемпературных свойств масел – смесь МС-20 с МС-8п и смесь ТСгип с жидкостью АМГ-10 (маслосмесь СМ-9).

Применение смесей масел усложняет эксплуатацию вертолетов и не может обеспечить безопасность полетов. Из синтетических масел в редукторах вертолетов Ми-2 и Ми-8, а также в главном редукторе тяжелонагруженного вертолета Ми-26 используется синтетическое масло Б-3В.

Шарниры винтов отечественных вертолетов смазывают сезонными маслами. В осевых шарнирах втулок винтов вертолетов, эксплуатирующихся летом используют масло МС-20, а зимой синтетическое масло на основе полиальфаолефинов и сложных эфиров ВО-12. Это масло можно использовать в интервале температур от +60°C до -50°C. Горизонтальные и вертикальные шарниры втулок винтов вертолетов смазывают летом маслом ТСгип, а зимой смесью ТСгип и АМГ-10.

## **8. Изменение физико-химических свойств масла во время работы в реактивном двигателе**

Во время работы реактивных двигателей качество масла, находящегося в системе смазки изменяется. Эти изменения происходят в результате окисления масел при высоких температурах, испарения части масла, накопления в нем продуктов износа, механических примесей и воды.

В процессе эксплуатации двигателя увеличивается вязкость масла в связи с тем, что часть легких углеводородов из масла испаряется. Характер изменения вязкости масел по мере исчерпания их ресурса во время работы в двигателе показан на рис.10.

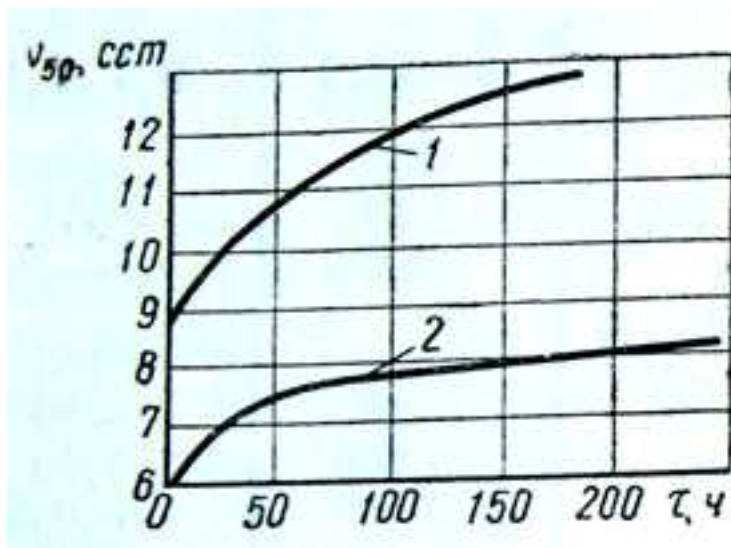


Рис.10 Увеличение вязкости минеральных незагущенных масел в процессе его работы в двигателе: 1- МС-8; 2- маслосмесь

Наиболее интенсивно вязкость масла увеличивается в первые 5 – 10 часов работы двигателя, затем процесс стабилизируется. Изменение вязкости следует учитывать при эксплуатации самолета в условиях низких температур. Если предположить, что двигатель легко запустить при кинематической вязкости не более 4000 мм<sup>2</sup>/с, то на свежем минеральном масле запуск возможен при температурах не ниже -35°С (рис.11)

При наработке 50 ч запуск двигателя может быть осуществлен только при температурах выше -25°С. Чем резче меняется вязкость масла в процессе эксплуатации, тем быстрее ухудшается прокачиваемость его при низких температурах. Иногда вязкость загущенных масел падает в процессе эксплуатации из-за того, что присадки могут вырабатываться, разрушаясь в процессе его работы или высаживаясь из масляной композиции.

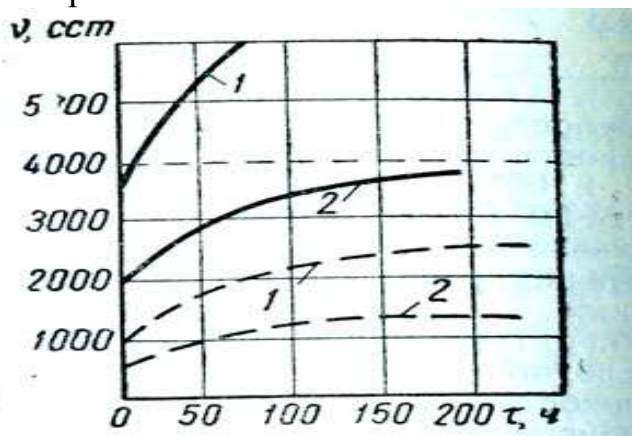


Рис.11 Изменение вязкости масла при отрицательных температурах в процессе работы двигателя.

1,2 свежие минеральные масла без присадок. Кинематическая вязкость при температуре -35°С;  
1',2'-теже масла. Кинематическая вязкость при температуре -25°С.

В процессе работы двигателя может увеличиваться температура вспышки (рис.12)

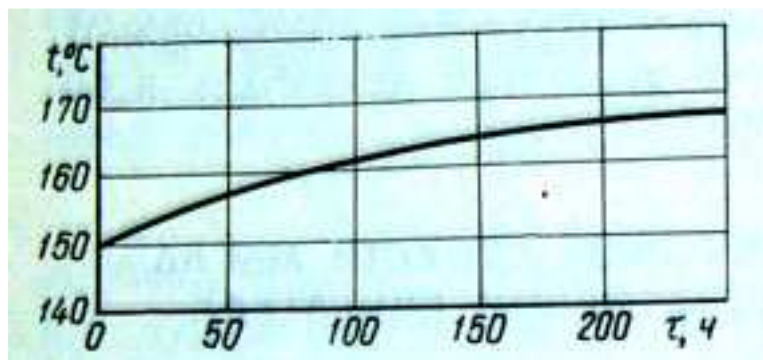


Рис.12 Изменение температуры вспышки масла в процессе работы двигателя.

Это тоже связано с потерей маслом легких фракций в первые часы работы двигателя.

Накопление механических примесей в маслах при их работе в реактивном двигателе происходит, в основном, в первые 50-100 ч. работы, после чего содержание их практически не меняется. Это может быть связано с приработкой двигателя и накоплением в масле продуктов износа, которые по действующим требованиям эксплуатации необходимо периодически контролировать (по содержанию железа и меди) с использованием современных анализаторов (например, рентгено-флюоресцентный анализатор «Призма»), позволяющих точно отслеживать накопление продуктов износа и частиц металлов конструкционных материалов в маслах, не допуская сверхнормативного износа узлов и агрегатов двигательной установки. Еще одним показателем, характеризующим степень выработки ресурса масла, является его окисление, которое можно оценить по изменению его кислотности в процессе эксплуатации. График зависимости изменения кислотности от ресурса работы приведен на рис. 13.

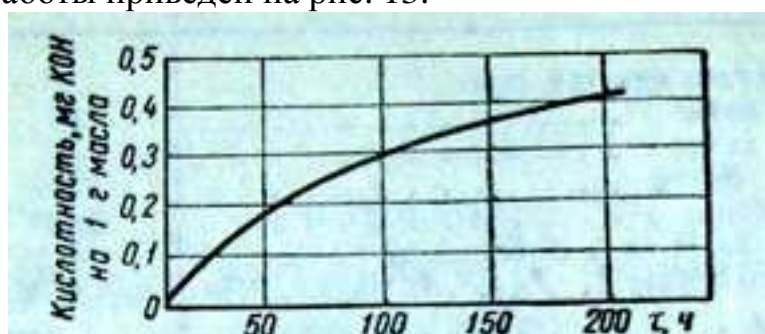


Рис. 13 Изменение кислотности масла в процессе работы двигателя.

В связи с тем, что масла в реактивных двигателях не соприкасаются с зоной горения, их свойства в процессе эксплуатации меняются сравнительно медленно, что дает возможность отрабатывать ресурс двигателя без замены масла, периодически пополняя потери рабочего объема масла по мере его выработки.



## **9. Масла для авиационных поршневых двигателей.**

### **Условия работы масла в поршневом двигателе**

Основные узлы трения авиационных поршневых двигателей являются самыми напряженными из всех типов двигателей внутреннего сгорания. Кроме того, в поршневом двигателе масло выполняет функцию уплотнителя между камерой сгорания и картером двигателя, следовательно, оно соприкасается с зоной горения горючей смеси. Это делает условия работы масла в двигателе весьма тяжелыми.

Смазка узлов трения и отвод тепла от деталей двигателя осуществляется маслом путем его циркуляции и барботажа. Циркуляция масла производится под давлением 0,4-1,0 мПа. Через двигатель прокачивается от 1100 до 3800 л/ч масла (в зависимости от типа двигателя и режима его работы). При сравнительно больших емкостях масляных баков за 1 ч частица масла успевает пройти через двигатель десятки раз.

В поршневых двигателях основным типом подшипников являются подшипники скольжения. Удельное давление в них достигает 6000 – 8000 Н/см<sup>2</sup>. Температура подшипника зависит, главным образом, от работы трения, температуры и количества масла, протекающего через него. В современных двигателях температура подшипника может достигать 150°С.

В двигателе масло попадает в различные температурные условия от 80°С в картере до 2500°С в камере сгорания, а в среднем, в различных узлах двигателя, колеблется от 100 до 280°С. Часть циркулирующего в двигателе масла проникает в камеру сгорания и сгорает вместе с топливом. Связанный с этим расход масла в зависимости от типа двигателя и его технического состояния может быть от 5 до 25 г/л.с•ч.

Для узлов трения авиационных двигателей характерны большие скорости движения. Так, например, скорость скольжения основных трущихся деталей находится в пределах 6-15 м/с.

Масло в двигателе приходит в соприкосновение с самыми разнообразными металлами и сплавами: сталями различных марок и различной обработки, алюминиевыми сплавами, баббитами, свинцовистой бронзой, кадмиево-серебряными сплавами и др.

Очистка масла в процессе работы производится пластинчатыми фильтрами, а также центрифугированием в полостях шатунных шеек коленчатого вала. Содержащиеся в масле загрязнения отбрасываются центробежными силами к периферии шейки и образуется осадок.

Чтобы обеспечить жидкостную смазку узлов трения в условиях высокого удельного давления и высокой температуры, а также хорошее уплотнение зазоров между поршнем и цилиндром, необходимо масло достаточно высокой кинематической вязкости, порядка 20-22 мм<sup>2</sup>/с при 100°С. При недостаточной вязкости жидкий слой масла не может удержаться в зазорах, и, в результате, усиливается износ деталей. Кроме того, увеличивается заброс масла в

цилиндры, из-за чего растет его расход, усиливается нагарообразование, происходит замасливание свечи, что приводит к перебоям в зажигании, детонации, перегреву и разрушению поверхности поршня. Наряду с этим нарушается уплотнение поршневых колец, падает компрессия, газы прорываются в картер, снижая мощность двигателя, загрязняется масло, усиливается коррозия подшипников и шламообразование.

Слишком высокая вязкость масла тоже нежелательна, так как она приводит к увеличению трения, и, следовательно, при режимной работе двигателя вызывает повышенную потерю мощности. При низкой температуре из-за высокой вязкости затрудняется запуск двигателя, а после запуска замедляется прокачка и ухудшается разбрызгивание масла. Свежее масло к узлам трения своевременно не поступает, а находящееся в зазорах за счет трения перегревается и вытекает. Возникает масляное голодание, повышенный износ или даже задир и заедание деталей.

В моменты пуска и остановки граничная пленка масла должна защищать узлы двигателя от сухого трения, а также обеспечивать надежную работу шестерен редуктора и других силовых передач, где образование жидкостного трения невозможно. Следовательно, масло должно обладать высокой смазывающей способностью. Таким образом, масло в двигателе подвергается действию высоких температур и давлений, находится в тесном контакте с различными металлами в присутствии кислорода воздуха. В таких условиях масло должно быть весьма стабильным, чтобы длительное время сохранять свои свойства и не давать больших загрязнений двигателя в виде нагара, лака и шлаков, что обеспечивается технологическими приемами в процессе его производства, описанными в предыдущих разделах.

### **9.1 Изменение свойств масла при работе поршневого двигателя**

В процессе работы двигателя находящееся в нем масло изменяет свои первоначальные свойства под действием ряда факторов, характерных для данного типа двигателя и условий его эксплуатации.

Прежде всего, в масле происходят процессы окислительной полимеризации углеводородов, в результате которых в нем накапливаются продукты окисления (асфальтены, смолы, карбоиды, органические кислоты и др.). Исследования показали, что некоторые вещества, образующиеся в процессе окисления, являются ингибиторами окисления. Продукты окислительной полимеризации выпадают из масла в виде лаковой пленки на деталях двигателя, и, тем самым, уменьшают каталитическое действие металлов на процессы окисления. Все это приводит к тому, что в общем случае процессы окисления замедляются с течением времени, а само масло становится более стойким против окисления (рис. 14-17).

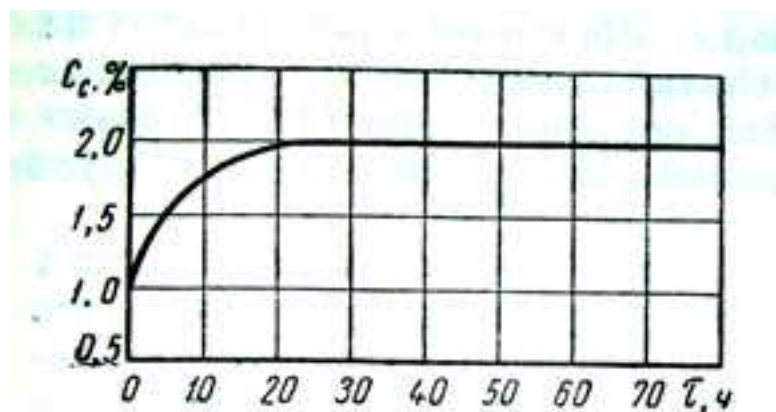


Рис 14 Изменение содержания смол в масле во время работы поршневого двигателя

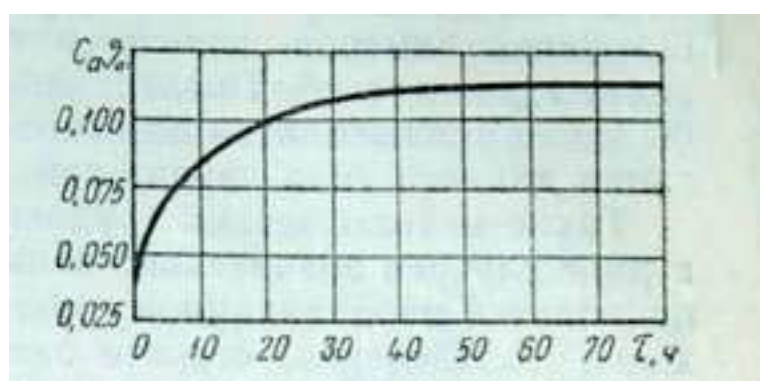


Рис 15 Изменение содержания асфальтенов в масле во время работы поршневого двигателя

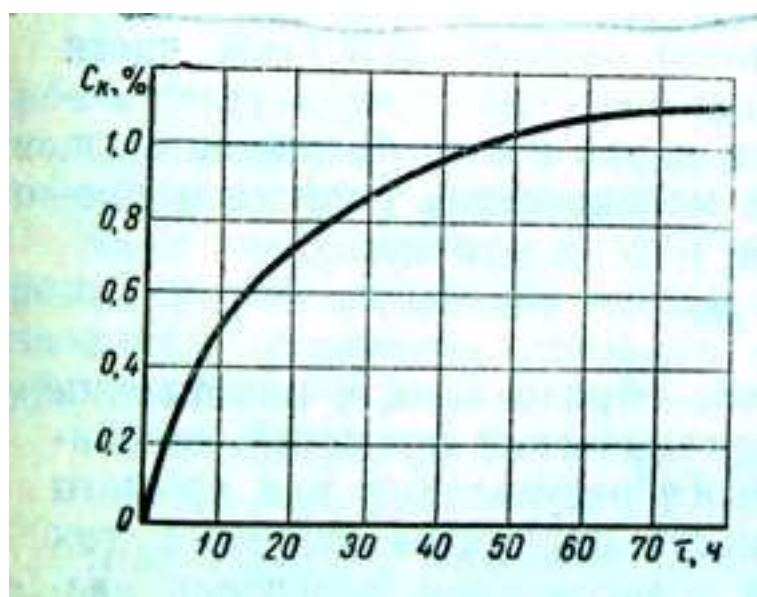


Рис. 16 Изменение содержания карбенов и карбонидов в масле в процессе работы поршневого двигателя

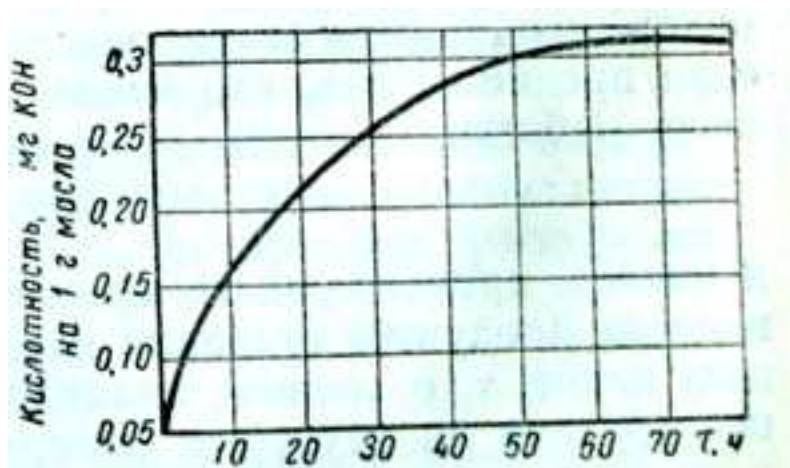


Рис.17 Изменение кислотности масла во время работы поршневого двигателя

Наряду с продуктами окислительной полимеризации в масле в процессе его работы накапливаются неорганические примеси в виде частиц износа, механических примесей, попавших в двигатель извне (частицы пыли), а также продукты коррозии и неполного сгорания топлива и масла.

Таким образом, в масле накапливаются примеси, которые можно разделить на две части – органическую часть (продукты окисления) и неорганическую часть (механические примеси, продукты износа, коррозии и т.п.).

Основными методами определения ресурса работы масла в двигателе, которыми традиционно пользуются конструкторы двигателей, являются стендовые и эксплуатационные испытания масел на полноразмерных двигателях с последующей обработкой результатов на основании замеров износа и снятия основных характеристик работы двигателя. Последующая корректировка сроков службы масел производится на основании обобщения опыта эксплуатации данного вида двигателей.

Такие методы весьма трудоемки, требуют значительных затрат на их проведение и в ряде случаев, занижают назначаемые ресурсы работы масел в двигателях. В этой связи полезно рассмотреть методику графоаналитического определения сроков службы авиационных масел, разработанную еще в 60-е годы прошлого века кафедрой технической эксплуатации Киевского института гражданской авиации.

По этому методу основным критерием состояния смазочного масла является интенсивность суммарного износа двигателя, зависящая от изменения свойств масла в процессе эксплуатации в двигателе. Предполагается, что суммарный износ деталей двигателя можно считать состоящим из суммы двух составляющих (Рис.18): износа, происходящего под влиянием свойств основной части масла, который зависит от физико-химических свойств углеводородов, входящих в него, т.е. того, износа, который формируется исходя из предположения о том, что масло не меняет своих свойств в процессе эксплуатации:  $Y_1 = Vt$

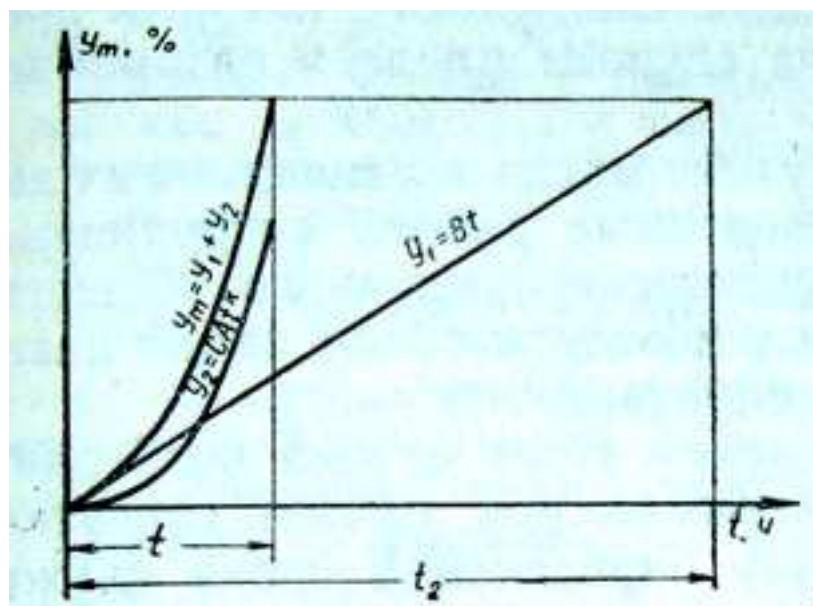


Рис. 18 Зависимость износа деталей двигателя от сроков службы масла

и износа, происходящего вследствие образования и накопления в масле продуктов старения и неорганических примесей, заносимых извне, т.е. износа, являющегося результатом как прямого воздействия на трущиеся поверхности продуктов старения, так и косвенного их влияния в связи с засорением двигателя различными отложениями:

$$Y_2 = CAAt^k.$$

Тогда общий износ двигателя будет равен:

$$Y_m = Y_1 + Y_2 = Bt + CAAt^k,$$

где:  $B$  – коэффициент, характеризующий свойства свежего масла;

$t$  – время работы двигателя, ч.;

$C$  – коэффициент пропорциональности;

$A$  – коэффициент, характеризующий скорость нарастания продуктов старения масла

$k$  – показатель степени.

Методика определения срока службы масла заключается в следующем.

На одном из двигателей того типа, для которого устанавливается срок службы масла, проводят серию замеров величин суммарного износа ( $Y_m$ ) через определенные промежутки времени ( $t$ ). Замер износа производят методом определения железа в масле, методом радиоактивных изотопов, методом разборки и замера основных трущихся деталей или совместно несколькими методами. Зная величину суммарного износа и время, за которое он достигнут, и построив график (рис 19), определяют коэффициенты  $C$  и  $A$ , и показатель степени  $k$ , составив предварительно систему уравнений.

Зная коэффициенты  $A$  и  $C$  и показатель степени, можно построить график изменения износа двигателя, который обусловлен наличием продуктов старения масла от времени работы по уравнению:

$$Y_2 = CAAt^k$$

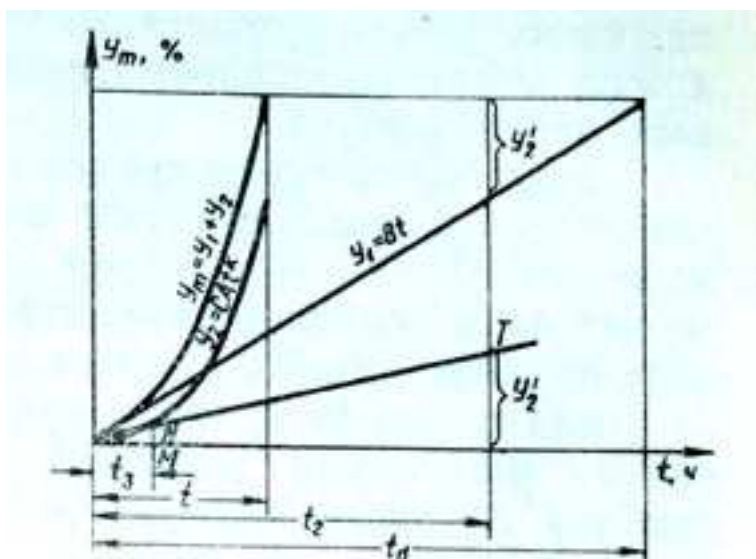


Рис 19 Графическое определение допустимого срока службы масла

Зная  $Y_m$  и  $Y_2$  можно построить линию износа, предполагая, что масло в процессе работы двигателя не меняет свои свойства, по уравнению

$$Y_1 = Y_m - Y_2.$$

При максимально допустимом износе  $Y_{m \text{ макс}}$  число часов его работы при открытой циркуляции будет равно  $t_d$  (рис 19). Если масло двигателя не менять, то величина максимального износа двигателя будет достигнута через  $t$  ч. Ресурс двигателя назначается по условиям максимальной надежности его работы с учетом износа, прочности и других факторов. Если ресурс двигателя определен в количестве  $t_2$  ч., то, выполнив ряд математических преобразований, легко определить срок службы масла и число замен масла в период работы двигателя до выработки ресурса.

Математическое выражение срока службы масла имеет следующий вид:

$$t_2 = \sqrt[k-1]{\frac{Y_m(1-m)}{m t_2^k A}} \quad ; \quad \text{где } m = \frac{t_2}{t_d} \leq 1$$

Данный метод определения срока службы масла разработан на основании исследований, проведенных по определению ресурса работы моторных масел для наземной техники.

Данный метод может использоваться для оценки ресурсов работы масел в двигателях, но даже при беглом знакомстве с ним остается много вопросов, связанных с допущениями, использованными при его объяснении. В последующие годы крупнейшие советские и зарубежные НИИ, такие как ЦИАМ, ГОСНИИ РАТ, 25 Гос НИИ МО РФ, НИИ ГА проводили развернутые исследования по оптимизации методов прогнозирования и оценки ресурса двигателей и масел по состоянию. В результате были разработаны и внедрены в практику инструментальные методы оценки остаточного ресурса масел,

базирующиеся на методах феррографии, атомной абсорбции, рентгеновской флюоресценции и ИК спектроскопии, позволяющие оперативно и достоверно оценивать остаточный ресурс работы масел в двигателях. Разработаны отраслевые методы и инструкции по такого рода работам, а в некоторых областях промышленности, например, в ж/д транспорте такая методика оформлена ГОСТом. За рубежом к настоящему времени действуют два стандарта, определяющие процедуры оценки остаточного ресурса смазочных материалов для двигателей внутреннего сгорания ASTM D 6224 и газовых и паровых турбин ASTM D – 4378. (подробное рассмотрение данного круга вопросов выходит за рамки данного учебного курса и здесь не рассматривается).

## **10. Ассортимент авиационных масел для ГТД отечественного производства**

### **10.1 Минеральные масла**

В России широкое распространение получили авиационные масла на минеральной основе. Это связано с их высоким качеством и относительно невысокой стоимостью.

**Масло МС-8п** ( ОСТ 38 101163-78) – наиболее широко распространенное масло на нефтяной основе с комплексом высокоэффективных присадок. Предназначено для ГТД дозвуковых и сверхзвуковых самолетов, у которых температура масла на выходе из двигателя не превышает 150°С, используется вместе с маслом МС-20 (в соотношениях 25:75, 50:50 и 75:25) в составе маселосмесей в ТВД, а также для консервации маселосистем авиационных двигателей. Превосходит масло МК-8 и МК-8п по вязкости при низких температурах, термоокислительной стабильности и ресурсу работы.

**Масло МС-8рк** (ТУ 38 1011181-88) – рабоче-консервационное масло на базе масла МС-8п с добавлением ингибитора коррозии. Предназначено для смазывания и консервации авиационных двигателей. Равноценно маслу МС-8п по своим эксплуатационным характеристикам и значительно превосходит по консервационным. При консервации маселосистем авиационных двигателей срок защиты составляет: для масла МК-8 – 3 мес., для масла МС-8п – 1 год, для масла МС-8рк – 4-8 лет.

**Масла МК-8, МК-8п** (ГОСТ 6457-66) – масла на нефтяной основе, производились из бакинских нефтей. Область их применения аналогична областям применения масел МС-8п и МС-8рк. В настоящее время не производятся.

**Масло МС-20** (ГОСТ 21743-76) - масло селективной очистки. Используют в шарнирах винтов вертолетов в качестве компонента в маселосмесях для ТВД.

**Маселосмесь СМ -4,5** (ТУ 0253-007-39247202-96) смесь авиационных масел МС-8п и МС-20 в соотношении 75:25. Предназначена для применения в самолетах с ТВД.

**Масло МН-7,5у** (ТУ 38.101722-85) – унифицированное масло на нефтяной основе с комплексом присадок. Разработано взамен маселосмесей, масла МН-7,5 и ВНИИНП-7. Можно применять в ТВД всех типов при температуре масла на выходе из двигателя до 150°С.

**Масло Эридан** (ТУ 38.401829-90) обладает высоким уровнем термической стабильности (370°С) и термоокислительной стабильности (180-200°С), трибологических характеристик (противоизносных, антифрикционных и противозадирных), а также хорошими антикоррозионными свойствами (не хуже масла МС-8рк). Область применения должна уточняться конкретно для каждого типа двигателя в соответствии с рекомендациями, изложенными в книге «Смазочные масла для приводов и нагнетателей газоперерабатывающих агрегатов» (авторы Хурумова А.Ф., Назарова Т.И. и др. М.,: 1996).

## 10.2 Синтетические масла

В связи с ростом теплонапряженности авиационных двигателей возникла необходимость применения в них более термостабильных масел. Минеральные масла уже не могли удовлетворять требования применения и в начале 60-х годов были начаты исследования по созданию термостабильных масел на основе синтетических продуктов. Из большого класса химических соединений предпочтение было отдано сложным эфирам моноспиртов и двухосновных органических кислот, а также эфирам многоатомных спиртов и синтетических жирных кислот (СЖК). Эти эфиры обладают наиболее приемлемыми физико-химическими свойствами и хорошей приемистостью к различным функциональным присадкам.

**Масло ИПМ-10** (ТУ 38.101299-90) – синтетическое углеводородное с комплексом высокоэффективных присадок. Работоспособно в интервале температур от -50°С до +200°С.

В конце 60-х годов было разработано и испытано с положительными результатами, не имевшими к тому времени зарубежных аналогов. Синтетическое углеводородное масло ИПМ-10 успешно применялось в качестве рабочего масла в теплонапряженных ТРД и во вспомогательных агрегатах летательных аппаратов. Масло ИПМ-10 вырабатывалось на основе изопарафиновых углеводородов (масло ИПМА -10) – смесь продуктов гидрокрекинга и гидроизомеризации парафина со сложным эфиром ДОС с добавками комплекса функциональных присадок. В 1993 г. производство масла ИПМ-10 было прекращено из-за отсутствия сырья, требуемого качества. С 1999 г. масло ИПМ-10 вырабатывается на основе изопарафиновых углеводородов, полученных в результате других технологических процессов – олигомеризацией альфаолефинов, в результате чего образуются полиальфаолефины (ПАОМЫ) различной вязкости. Применяют в теплонапряженных ГТД военной и гражданской авиации с температурой масла на выходе из двигателя до 200°С, а



также в авиационных турбохолодильниках в качестве унифицированного сорта масла и в других агрегатах. Можно использовать для недлительной консервации

**Масло ВНИИНП -50-1-4-ф** (ГОСТ 13076-86) – синтетическое диэфирное масло с присадками, повышающими противоизносные свойства и термоокислительную стабильность. На основе сложных эфиров диизоктилового спирта и себаценовой кислоты (ДОС). В 60х годах было разработано и допущено к применению масло ВНИИНП 50-1-4ф, обладающее хорошими низкотемпературными свойствами и термостабильное до 175-180°C. Применяют в двигателях с температурой масла на выходе до 175°C и в турбохолодильниках.

**Масло ВНИИНП-50-4-у** (ТУ38.401-58-12-91) – синтетическое диэфирное, содержащее эффективную композицию антиокислительных присадок, позволяющих применять масло при температуре от -60 до +200°C с перегревом до 225°C. Допущено к применению во всех авиационных ГТД. Может заменить масло ВНИИНП-50-4-ф во всех отношениях. Не требуется замена резин и конструкционных материалов. Используется как одно из основных в военной технике (например, МиГ-29). Рекомендовано для перспективной техники.

**Масло Б-3В** (ТУ 38.101295-85) – синтетическое масло на основе сложных эфиров пентозэритрита и жирных кислот C<sub>5</sub>-C<sub>9</sub> с комплексом присадок. В их состав включена антиокислительная (параоксидифениламин) и противозадирная (2-меркаптобензтриазол). Применяют в ГТД, редукторах вертолетов и другой техники с температурой масла на выходе из двигателя до 200°C, однако высокая коррозионная агрессивность его к ряду конструкционных материалов (медные и магниевые сплавы) при повышенных температурах ограничивают температурные пределы его применения. Обладает высокими смазывающими свойствами. Недостаток: выпадение в осадок противозадирной присадки при низкой температуре эксплуатации в результате окисления с последующим растворением осадка в масле при 70-90°C подобно тому, как это происходит в масле 36/1КуА вследствие окисления противозадирной присадки, особенно в зимнее время. В настоящее время ряд российских фирм производителей активно занимается устранением данного недостатка.

**Масло 36/1-КУА** (ТУ 38.101384-78) – синтетическое на основе сложных эфиров с комплексом присадок. Обладает высокими противозадирными свойствами. Используют в ГТД с температурой масла на выходе двигателя до 200°C. на основе смеси эфиров диэтиленгликоля и пентозэритрита и СЖК фракции C<sub>5</sub>-C<sub>9</sub> было разработано масло 36/1, содержащее в качестве антиокислительной присадки 0,5% параоксидифениламина. Позже, на основе этого масла, был разработан последовательно целый ряд композиций масел – 36/1К, 36/1Ку и 36/1КуА. В составе указанных масел содержалась активная противозадирная присадка 2-меркаптобензтриазол («каптакс»), введенная для улучшения смазывающей способности масла 36/1. Недостатком этих синтетических масел являлась высокая коррозионная агрессивность по отношению к цветным металлам и магниевым сплавам. Наличие в составе

масел 36/1К, 36/1Ку и 36/1КуА присадки каптакс обуславливало потенциальную возможность образования осадков в маслосистеме двигателей вследствие окисления присадки кислородом воздуха при повышенных температурах. Образующийся при этом продукт окисления дитиобензтиозол («альтакс») обладает значительно худшей растворимостью в основе масла, особенно при низких температурах и в определенных условиях может выпадать в осадок. В настоящее время не вырабатывается.

**Масло ЛЗ-240** (ТУ 301-04-010-92) - синтетическое на основе сложных эфиров пентоэритрита и жирных кислот с комплексом присадок. Рекомендуется для использования в тех же двигателях, в которых применяется масло Б-3В.

**Масло ПТС-225** (ТУ 38.401-58-1-90) - синтетическое высокостабильное на основе сложных эфиров пентоэритрита и синтетических жирных кислот C<sub>5</sub>-C<sub>9</sub>. Работоспособно в интервале температур от -60 до +225°С. Рекомендовано к применению в теплонапряженной авиационной технике в качестве унифицированного масла для обработки новых теплонапряженных авиационных ГТД (ТРД, ТВД, ТВВД, турбовальных двигателей и редукторы вертолетов). Масло обладает улучшенными вязкостно-температурными свойствами и высокой термоокислительной стабильностью. Рекомендуется для перспективной авиатехники, а также взамен товарных нефтяных синтетических авиамасел. По своим физико-химическим и эксплуатационным свойствам наиболее соответствует (по сравнению с другими маслами) американской спецификации MIL – L – 23699F.

**Масло ВТ-301** (ТУ 38.101657-85) - синтетическое на основе кремний-органических жидкостей с присадкой.

Для работы авиационных ТРД высокой тепловой напряженности было разработано масло ВТ-301 на основе фторорганосилоксанов. Масло ВТ-301 обладает высокой термоокислительной стабильностью (до 250-280°С), уникальными низкотемпературными свойствами, не агрессивно к большинству конструкционных авиационных материалов. К недостаткам масла следует отнести сравнительно невысокие противоизносные свойства, сложность технологии изготовления и, как следствие этого, чрезмерно высокую стоимость.

**Масло ВНИИНП-25 шарнирное** (ГОСТ 11122-84) – нефтяное низкозастывающее масло (зимний сорт), загущенное полимерной присадкой, содержит антиокислительную присадку. В настоящее время не производится.

**Масло ВО-12** (ТУ РМ=80-4-95) – всесезонное масло для осевых шарниров и втулок винтов вертолетов. Разработано взамен масла ВНИИНП-25. Работоспособно при температуре окружающей среды от -50 до +60°С. Представляет собой смесь синтетического ПАО и диэфиров с комплексом присадок.

## **11. Зарубежные аналоги отечественных авиамасел, использующиеся на рынке**

Наиболее широко представлены на российском рынке авиамасел авиационные масла фирмы NYSCO S.A дистрибьютером которой является фирма ЗАО

«Туполевсервис». В табл. 2 приведен основной ассортимент продукции этой фирмы и области их применения в качестве заменителей отечественных авиамасел.

Переход на рыночные отношения обуславливает появление трудностей в обеспечении отечественных двигателей маслами. Предпринимателям экономически выгодно производить и закупать за рубежом все новые масла улучшенного качества. При этом потребители техники испытывают неудобства, так как отечественные двигатели, подвергаясь неоднократным ремонтам, эксплуатируются долгие годы и должны работать на относительно старых и, следовательно, более дешевых маслах.

Особенно это касается потребителей специальной техники, которые связаны с длительным хранением как самой техники, так и запасов масел.

Таблица 2

**Авиационные масла фирмы NYCO S.A(Франция) и Solutia inc.(США)**

Наименование	Спецификация	Отечественная марка	Основная область применения
<b><u>TURBONICOIL</u></b> <b><u>210A</u></b>	AIR 3514/A	<u>ИПМ 10</u> ТУ 38.101299-90, <u>ВНИИИП50-1-4-ф</u> ГОСТ 13076-86, <u>ВНИИИП50-1-4-у</u> ТУ 38.401-58-12-10	Синтетическое масло для газотурбинных двигателей
<b><u>TURBONICOIL</u></b> <b><u>321</u></b>	AIR 3515/B	<u>МС-8П</u> ОСТ 38.01163-78, <u>МС-8РК</u> ТУ 38.1011181-88	Минеральное масло для газотурбинных двигателей
<b><u>TURBONICOIL</u></b> <b><u>98</u></b>	DEF STAN 91-98/1	<u>Б-3В</u> ТУ 38.101295-85	Синтетическое масло для газотурбинных авиадвигателей и редукторов вертолетов
<b><u>TURBONICOIL</u></b> <b><u>600</u></b>	Mil-PRF 23699F class STD	Синтетическое масло для авиационных газотурбинных двигателей с высокой термостойкостью.	

Внедрение новых масел для этой группы потребителей ведет к разунификации ассортимента и неоправданным трудностям в нефтепродуктообеспечении. Вместе с тем следует отметить, что рекламируемый уровень эксплуатационных свойств зарубежных масел может

оказаться преувеличенным, поскольку в перечень показателей, характеризующих эксплуатационные свойства масел, привносятся новые, часто не имеющие технической необходимости для российских производителей двигателей, например, антиржавейные, шламообразующие и другие свойства. По решающим, действительно необходимым и достаточным для обеспечения работоспособности отечественных двигателей характеристикам, эти масла вряд ли превосходят достигнутый уровень отечественных масел.

Подбор масел к двигателям отечественного производства осуществляется на базе регламентированной системы испытаний, позволяющей не только правильно подобрать масло к конкретному типу двигателя, но и осуществить классификационное деление масел по уровням качества и возможной его замены без риска ухудшить эксплуатационные характеристики двигателей отечественного производства. В этой связи существующие комплексы методов оценки в 1996 г. были пересмотрены и дополнены, но процесс их совершенствования продолжается.

## **12. Унификация ассортимента авиационных масел**

Большой ассортимент масел для авиационных ГТД, особенно маловязких минеральных, создавал серьезные сложности при эксплуатации авиатехники. Многие из этих масел характеризовались невысокими эксплуатационными характеристиками, не имели каких-либо преимуществ перед другими маслами, вырабатывались в ограниченном объеме из-за усложнения технологии получения (необходимость повторной ректификации, применение дефицитных растворителей и т.л.), вызывая затруднения при заправке техники. Количество одних только возможных маслосмесей, которые могли применяться в эксплуатации, было более двадцати. Не лучше обстояло дело и с синтетическими маслами.

Ассортимент масел для авиационных ГТД необходимо было резко сокращать, оставляя в эксплуатации только лучшие по качеству масла, обеспеченные достаточным количеством сырья.

В первую очередь нужно было классифицировать все масла по какому-то одному существенному признаку, разработать требования к каждому классу масел и провести сравнительные лабораторные испытания всех масел.

В середине 70-х годов ЦИАМ была предложена классификация авиационных масел, связывающая такой наиболее важный показатель, как термоокислительная стабильность с рабочими температурами масла в ГТД, а именно с температурой масла на выходе из двигателя (табл. 3). Руководящий технический материал авиационной промышленности РТМ 1585-78, в котором была зафиксирована классификация масел для авиационных ГТД, устанавливал требования к качеству масел различных классификационных групп и являлся исходным документом при разработке технических требований к техническому заданию на разработку образцов новых масел или иной группы.

Нормы по каждому показателю физико-химических и эксплуатационных свойств для каждой группы масел были установлены на основании лабораторных исследований всего ассортимента имеющихся к тому времени масел едиными методами и результатами стендовых испытаний двигателей, а также опыта применения масел в эксплуатации.

В результате унификации авиационных смазочных масел из практики применения в авиадвигателях были исключены такие минеральные масла как трансформаторное ТК, МС-6, МК-8, МК-6, МК-8п, МС-8 и маслосмеси с их использованием, масло МН-7,5, а также синтетические масла 36/1, 36/1Ку, ВНИИНП-7 и др.

В начале 80-х г.г, во вновь разрабатываемых и модернизируемых для применения авиационных ГТД нашел отражение в разработанном ЦИАМ отраслевом стандарте ОСТ 1.00148 «Масла для авиационных ГТД. Порядок назначения», а также в государственном стандарте ГОСТ В 18241. Указанный отраслевой стандарт предусматривает назначение для авиационных ГТД двух марок масел – основной и дублирующей.

Основные марки масел предназначены для постоянной эксплуатации двигателей и должны обеспечивать их работу в полном соответствии с предъявляемыми к ним требованиями. Дублирующие марки масел предназначены для эксплуатации двигателей при отсутствии основных марок масел и должны обеспечивать достижения наиболее важных из заданных тактико-технических характеристик двигателей в конкретных условиях эксплуатации.

Номенклатура основных и дублирующих марок масел для авиационных ГТД, рекомендованных отраслевым стандартом ОСТ 1.00148 приведен в табл. 4 .

Таблица 3.

Классификационные группы масел для ГТД

Наименование показателя	Группа масел				
	I	II	III	IV	V
Максимальная рабочая температура масла, °С на выходе из двигателя	150	200	250	300	350-450
-в тонком слое на стенках полостей	250	300	350	400	
Термоокислительная стабильность масла в объеме по ГОСТ 23797*) при температуре, °С	150	200	250	300	350

\*) 100 мл масла, 170 мл/мин воздуха, пластинки катализаторы: ШХ-15, АК-4, М2 50 ч

Таблица 4.

Номенклатура основных и дублирующих марок масел для авиационных ГТД

Основная марка масла		Дублирующая марка масла		Область применения (тип двигателя)
Марка масла НТД	Максимальная рабочая температура, °С	Марка масла НТД	Максимальная рабочая температура, °С	
МС-8рк ТУ 38.1011181- 88	150	МС-8П ОСТ 38.01163-78	150	ТРД старых типов
ИПМ-10 ТУ 38.1011299- 90	200	ВНИИНП 50-1-4у ТУ 38.401- 58-12-91	200	Теплонапряжен- ные ТРД
ЛЗ-240 ТУ 301-04- 010-92	200	Б-3В ТУ 38.1- 1295-85	175	ГТД и редукторы вертолетов, новые ТВД, ТВВД
МН-7,5у ТУ 38.101722-85	150	СМ-4,5 СМ-11,5	125	ТВД старых типов
ВТ-301 ТУ 38.101657-85	250			Специальные ГТД

Примечания:

Масло ВТ-301 назначается для ГТД в случаях, когда оно не сменяется и не пополняется в процессе эксплуатации.

Максимальная рабочая температура соответствует температуре масла на выходе из двигателя и измеряется на общем выходе их маслососов.

### 13. Комплекс методов квалификационной оценки масел для ГТД

Приведенный в таблице 5 комплекс методов предназначен для квалификационной оценки эксплуатационных свойств указанных в нем продуктов и применяется в дополнение к методам, предусмотренных стандартами на эти продукты в случаях:

1. При квалификационных испытаниях опытных образцов, указанных в нем товарных продуктов, изготовленных из новых видов сырья, компонентного состава, технологии производства или переносе производства новому производителю.

2. При приемочных лабораторно-стендовых испытаниях опытных образцов, указанных в нем новых товарных продуктов.

3. При проверке качества товарных продуктов, проводимых Межведомственной комиссией (МВК) по допуску и применению топлив, масел, смазок и специальных жидкостей при агентстве по техническому регулированию и метрологии РФ в рамках МВК о допуске к производству и применению продуктов, вырабатываемых этими предприятиями.

4. При периодических проверках качества товарных продуктов, проводимых министерствами России, которым подведомственны соответствующие предприятия – изготовители этих продуктов.

Таблица 5

### ПЕРЕЧЕНЬ

методов, входящих в комплекс методов квалификационной оценки масел для  
ГТД

№№ пп	Наименование валификационного метода и оценочные показатели	ГОСТ на метод	Организации, проводящие испытания
1	2	3	4
1	Термоокислительная стабильность в объеме	ГОСТ 23797	ВНИИ НП 25 ГосНИИ МО РФ ЦИАМ
2	Термоокислительная стабильность (в тонком слое)	ГОСТ 23175	Те же
3	Вязкость кинематическая мм <sup>2</sup> /с (при макси- мальной рабочей температуре).	ГОСТ 33	Те же
4	Фракционный состав методом испарения	ГОСТ 8674	Те же
5	Степень чистоты	ГОСТ 12275	Те же
6	Смазывающие свойства на ЧШМ (Рк, Ди)	ГОСТ 9490	Те же
7	Вспениваемость	ГОСТ 21058	Те же
8	Защитные свойства масла в камере Г-4 при погружении в электролит	ГОСТ 9.054 (ме- тоды 1-4)	ВНИИ НП 25 ГосНИИ МО РФ
9	Испаряемость в чашечках	ГОСТ 20534	ВНИИ НП 25 ГосНИИ МО РФ
10	Работоспособность масел и маслосмесей на редукторной установке Ш-3	Решение ГМК	ЦИАМ
11	Склонность масел к образованию высоко-	Решение	ВНИИ НП

	температурных отложений на приборе «наклонная плита»	ГМК	25 ГосНИИ МО РФ
12	Склонность масел к образованию высокотемпературных отложений на установке ВЦМ	Решение ГМК	25 ГосНИИ МО РФ
13	Склонность масла к воздействию кислорода воздуха при высоких температурах на установке УКМ-1м	Решение ГМК	в/ч 22737 д
14	Коррозионная агрессивность масел по методу ВИАМ (100 ч. методика)	Решение ГМК	ВИАМ
15	Совместимость масел и масел с присадками	Решение ГМК	ВНИИ НП 25 ГосНИИ МО РФ
16	Гигроскопичность синтетических масел	Решение ГМК	ВНИИ НП 25 ГосНИИ МО РФ
17	Гидролитическая способность синтетических масел	Решение ГМК	25 ГосНИИ МО РФ
18	Содержание присадок с помощью тонкослойной хроматографии	Решение ГМК	ГосНИИ ГА 25 ГосНИИ МО РФ
19	Стабильность вязкости загущенных масел, содержащих вязкостные полимерные присадки на диспергаторе УЗДН	Решение ГМК	ВНИИ НП 25 ГосНИИ МО РФ
20	Воздействие масел на уплотнительные резины	Решение ГМК	НИИ РП 25 ГосНИИ МО РФ
21	Прогнозирование сроков хранения	Решение ГМК	ВНИИ НП 25 ГосНИИ МО РФ

#### 14. Гидравлические жидкости

Первые авиационные гидрожидкости применялись для создания давления в тормозных системах. В таких системах использовалась гидравлическая жидкость на основе растительных масел. По мере разработки более крупных и скоростных самолетов возрастала потребность в использовании гидросистем, а также изменялись предъявляемые к ним требования. Эти разработки привели к созданию гидравлических жидкостей на основе нефтепродуктов, например, АМГ-10 по ГОСТ 6794-75 и ее западных аналогов AeroShell Fluid 41 и Mobil Aero HF и FH-51, выпускающихся по MIL-H 5606.

Возросшее число возгораний авиационных гидравлических жидкостей вызвало всеобщую озабоченность в коммерческой авиационной отрасли, что дало толчок к проведению разработок негорючих гидравлических жидкостей



как на Западе, силами специалистов крупных западных компаний Monsanto и Chevron, так и в СССР, сотрудниками институтов ВНИИ НП, ВИАМ и ГосНИИ ГА. Эти работы проводились на Западе совместно с крупными авиастроительными фирмами Дуглас и Боинг, а в нашей стране ведущими отечественными авиационными КБ Туполева, Ильюшина и специализированными агрегатными заводами «Родина». «Вперед» и «Рубин».

Результатами этих разработок стало внедрение в широкую практику эксплуатации воздушных судов негорючих гидравлических жидкостей III и IV поколений, получивших на западе торговые названия Skydrol LD-4. Skydrol 500B-4. Hydret-4a+ , и применяемых практически во всех современных западных самолетах гражданской авиации их отечественными аналогами являются жидкости НГЖ-4 и НГЖ-5у, которые используются в таких российских самолетах, как Ил-86, Ил-96-300, Ил-96-400, Ил-114, Бе-200, Ту-204, Ту-214 и др.

#### **14.1 Общие требования и свойства**

Рабочие жидкости для гидравлических систем разделяют на минеральные и синтетические. По назначению их делят в соответствии с областью применения:

- для летательных аппаратов и наземной мобильной техники;
- для гидротормозных и амортизационных устройств различных машин;
- для гидроприводов, гидропередач и масляных циркуляционных систем различных агрегатов, машин и механизмов.

Основная функция рабочих жидкостей для гидравлических систем – передача механической энергии от ее источника к месту использования с изменением значения приложенной силы.

Гидравлический привод не может действовать без жидкой рабочей среды, являющейся необходимым конструктивным элементом любой гидравлической системы. В постоянном совершенствовании конструкций гидроприводов отмечаются следующие тенденции:

- повышение рабочих давлений и связанное с этим расширение верхних температурных пределов эксплуатации рабочих жидкостей;
- уменьшение общей массы привода или увеличение отношения передаваемой мощности к массе, что обуславливает более интенсивную эксплуатацию рабочей жидкости;
- уменьшение рабочих зазоров между деталями рабочего органа (выходной и приемной полостей гидросистемы), что ужесточает требование к чистоте рабочей жидкости (или ее фильтруемости при наличии фильтров в гидросистеме). С целью удовлетворения требований, продиктованных указанными тенденциями развития гидроприводов, современные рабочие жидкости для них должны иметь определенные характеристики:
  - обладать оптимальным уровнем вязкости и хорошими вязкостно-температурными свойствами в широком интервале температур, т.е. высоким индексом вязкости;

-отличаться высоким антиокислительным потенциалом, а также термической и химической стабильностью, обеспечивающими длительную беспрерывную работу жидкости в гидросистеме;

-защищать детали гидропривода от коррозии;

-обладать хорошей фильтруемостью;

-иметь необходимые деаэрирующие, деэмульгирующие и антипенные свойства;

-предохранять детали гидросистемы от износа;

-быть совместимыми с материалами деталей гидросистемы.

Большинство массовых гидрожидкостей вырабатывают на основе хорошо очищенных базовых масел, получаемых из рядовых нефтяных фракций с использованием современных технологических процессов экстракционной и гидрокаталитической очистки.

Физико-химические и эксплуатационные свойства современных гидравлических масел значительно улучшаются при введении в них функциональных присадок – антиокислительных, противоизносных, антипенных и др.

**Вязкостные и низкотемпературные свойства** определяют температурный диапазон эксплуатации гидросистем и оказывают решающее влияние на выходные характеристики гидропривода. При выборе вязкости гидравлического масла нужно знать тип насоса. Изготовители, как правило, рекомендуют для него масла определенной вязкости: максимальной, минимальной и оптимальной.

Если вязкость опускается ниже допустимой, то растут объемные потери (утечки) в насосе и клапанах, соответственно падает мощность и ухудшаются условия смазывания. Пониженная вязкость гидравлического масла вызывает наиболее интенсивное проявление усталостных видов изнашивания контактирующих деталей гидросистемы.

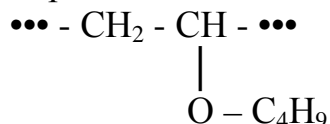
Повышенная вязкость значительно увеличивает механические потери привода, затрудняет относительное перемещение деталей насоса и клапанов, делает невозможной работу гидросистемы в условиях пониженных температур.

Вязкость масла непосредственно связана с температурой кипения масляной фракции, с ее средней молекулярной массой, с групповым химическим составом и строением углеводородов. Указанными факторами определяется абсолютная вязкость масла, а также его вязкостно-температурные свойства, т.е. изменение вязкости при изменении температуры. Последнее, характеризуется **индексом вязкости** масел.

Для улучшения вязкостно-температурных свойств применяются вязкостные (загущающие) присадки – полимерные соединения. В составе товарных гидравлических масел в качестве загущающих присадок используют полиметакрилаты, полиизобутилены и продукты полимеризации винил-бутилового эфира (винипола).

В частности, в качестве вязкостной присадки к гидрожидкости АМГ-10, широко используемой в авиации, применяют поливинилалкиловые эфиры.

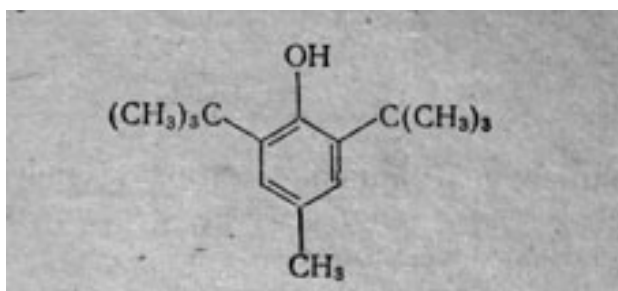
Последние получают катионной полимеризацией простых виниловых эфиров в присутствии катализаторов Фриделя – Крафтса или Циглера – Натта. Полимеры винилбутилового эфира (виниполы) выпускаются двух марок ВБ-2 и ВБ-3, которые различаются молекулярной массой:



Виниполы ВБ-2 и ВБ-3 с молекулярной массой 6 000 – 12 000 применяются в гидротормозных и гидравлических жидкостях. Винипол не только повышает вязкость и индекс вязкости масел, но и улучшает их смазывающие свойства, однако он недостаточно устойчив к механической и термоокислительной деструкции.

**Антиокислительная и химическая стабильности** характеризуют стойкость масла к окислению в процессе эксплуатации под воздействием температуры, усиленного барботажа масла воздухом при работе насоса. Окисление масла приводит к изменению вязкости (как правило повышению) и накоплению в нем продуктов окисления, образующих осадки и лаковые отложения на поверхности деталей гидросистемы, что затрудняет ее работу.

Широкое применение фенольные соединения нашли в качестве антиокислительных присадок к топливам и моторным маслам. Одной из наиболее распространенных присадок такого типа является соединение, имеющее торговое название *ионол*. Его производят в широких масштабах алкилированием п-крезола изобутиленом и добавляют к топливам и маслам в концентрации 0,2-0,3%. Присадки такого типа снижают окисление товарных продуктах при температурах до 170°C



4-метил-2,6 ди-трет-бутилфенол (ионол)

В гидросистемах машин и механизмов обычно присутствуют детали из разных металлов, разных марок сталей, алюминия, бронзы, которые могут подвергаться **коррозионно-химическому изнашиванию**. Коррозия металлов может быть электрохимической, возникающей обычно в присутствии воды, и химической, протекающей под воздействием химически агрессивных сред (кислых соединений, образующихся при окислении масла) и под действием

химически активных продуктов расщепления присадок при повышенных контактных температурах поверхностей трения. Устранению коррозии металлов способствуют вводимые в масла присадки – ингибиторы окисления, препятствующие образованию кислых соединений и специальные антикоррозионные добавки.

Стремление к улучшению **противоизносных** свойств гидравлических масел вызвано включением в новые конструкции гидравлических систем интенсифицированных гидравлических насосов. Наиболее распространенные в качестве присадок, обеспечивающие достаточный уровень противоизносных свойств гидромасел получили диалкилдитиофосфаты металлов (в основном цинка) или беззольные (аминовые соли и сложные эфиры дитиофосфорной кислоты).

К гидравлическим маслам предъявляют достаточно жесткие требования по нейтральности их по отношению к длительно контактирующим с ними металлам. Учитывая, что рабочие температуры масла в современных гидропередачах достаточно высоки и резиновые уплотнения могут быстро разрушаться, в гидравлических маслах недопустима высокая концентрация ароматических углеводородов, проявляющих наибольшую агрессивность по отношению к резинам. Содержание ароматических углеводородов характеризуется показателем «анилиновая точка» базового масла.

При работе циркулирующих гидравлических масел недопустимо **пенообразование**. Оно нарушает подачу масла к узлу трения и, насыщая масло воздухом, интенсифицирует его окисление, ухудшая отвод тепла от рабочих поверхностей, вызывает кавитационные повреждения деталей, перегрев гидропривода и его преждевременный износ. Для обеспечения хороших антипенных свойств масла преимущественное значение имеет полнота удаления из базовых масел поверхностно активных смолистых веществ. Чтобы предотвратить образование пены или ускорить ее разрушение, в масло вводят антипенную присадку (например, полиметилсилоксан), которая снижает поверхностное натяжение на границе раздела жидкости и воздуха, что приводит к ускоренному разрушению пузырьков пены.

В составе гидравлических масел крайне нежелательно присутствие **механических примесей и воды**. Вследствие весьма малых зазоров рабочих пар гидросистем наличие загрязнений может привести не только к износу элементов гидрооборудования, но и к заклиниванию деталей. Для очистки рабочих жидкостей от загрязнений в гидросистемах применяют фильтры различных типов. Даже незначительное количество (0,05-0,1%) воды отрицательно влияет на работу гидросистемы. Вода, попадающая в гидросистему с маслом, или в процессе эксплуатации, ускоряют процесс окисления масел, вызывают гидролиз гидролитически компонентов масла (в частности присадок – солей металлов). Продукты гидролиза присадок вызывают электрохимическую коррозию металлов гидросистемы.

В большинстве гидросистем самолетов гражданской авиации, введенных в эксплуатацию в 60-х – 70х гг. используется минеральное масло **АМГ-10** (ГОСТ 6794-75), работающее в интервале температур окружающей среды от минус 60 до +55°С. Оно вырабатывается на основе глубокоде-ароматизированной низкозастывающей фракции, получаемой из продуктов гидрокрекинга смеси парафинистых нефтей, состоящей из нафтеновых и изопарафиновых углеводородов. Содержит загущающую присадку винипол и антиокислительную присадку ионол, о которых было сказано выше, а также специальный отличительный краситель.

Ее зарубежными аналогами являются гидрожидкости AeroShell Fluid 41 и Mobil Aero HF и FH-51, которые выпускаются по MIL-H 5606.

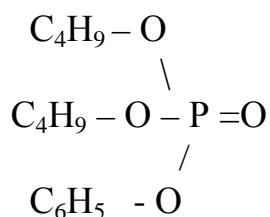
Основные физико-химические свойства жидкости АМГ-10 приведены в табл. 6.

Таблица 6.

Основные характеристики гидравлического масла АМГ-10 по ГОСТ 6794-75.

Показатели	Нормы
1	2
Внешний вид	Прозрачная жидкость красного цвета
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с при температуре: 50°С, не менее -50°С, не более	10 1250
1	2
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	93
Температура застывания, °С, не выше	-70
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,03
Плотность при 20°С, кг/м <sup>3</sup> , не более	850

Как было сказано выше, в современных типах самолетов применяются **негорючие гидравлические жидкости**, которые представляют собой синтетические продукты, изготавливающиеся на базе эфиров фосфорной кислоты. Так, отечественные негорючие жидкости НГЖ-4 и НГЖ-5у, производятся на основе дибутилфенилфосфата (ДБФФ), имеющего химическую формулу



Зарубежные аналоги негорючих гидрожидкостей в своей основе также имеют сложные эфиры фосфорной кислоты различного строения.

Основные характеристики негорючих гидрожидкостей приведены в табл. 7.

Таблица 7.

**Основные характеристики негорючих гидрожидкостей НГЖ-5у и Skydrol 500В-4**

Показатели	Нормы для НГЖ 5-у	Нормы для Skydrol 500В-4
Внешний вид	Прозрачная жидкость фиолетового цвета	Прозрачная жидкость фиолетового цвета
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с при 40°С при 50°С при минус 54°С при минус 60°С	- <10,5 - <5 000	11,4-12,5 - <4 200 -
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,15	0,10
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не выше	165	177

Композиция масла состоит также из загущающей присадки на основе полимерных акрилатов, обеспечивающих улучшенные вязкостно-температурные характеристики продукта, а также ряда присадок, улучшающих эксплуатационные свойства, такие как антиокислительную, антиэлектроэрозионную, противоизносную и противозадирную устойчивости, а также краситель в качестве отличительной метки от других продуктов.

Отдельное место занимает введение в композицию жидкости эпоксидной присадки, значительно удлиняющей ресурс работы жидкости за счет снижения ее окисления.

Самым значительным механизмом разложения жидкости в авиационных гидравлических системах является гидролиз (реакция с водой), потому что данная реакция протекает даже при умеренных температурах. Само собой разумеется, что при более высоких температурах гидролиз будет протекать с более высокой скоростью. Эфиры фосфорной кислоты очень гигроскопичны (они очень быстро поглощают воду из атмосферы), следовательно, в гидравлической жидкости обычно содержится несколько тысяч ppm воды, достаточных для разложения эфира. Арил и алкил-арилфосфаты более склонны к гидролитическому разложению, чем алкилфосфаты.

Процесс прогрессирует с нарастающей скоростью по мере повышения температуры. Окисление и гидролиз также катализируются такими металлами, как железо и медь. Во всех случаях вредными побочными продуктами является производное соединение фосфорной кислоты. «Сильная» кислота может повредить детали гидравлической системы, может оказать агрессивное

действие по отношению к эластомерам и разложить их, а также может разъедать механические детали и трубопроводную обвязку.

На ранней стадии внедрения и применения авиационных гидравлических жидкостей на базе эфиров фосфорной кислоты приходилось уделять очень большое внимание техническому обслуживанию гидравлических систем, поскольку образование кислоты вследствие гидролиза является преобладающим механизмом разложения эфиров фосфорной кислоты из-за содержания, как правило, высоких концентраций воды, и окисленные жидкости приходилось часто заменять.

В конце 60-х г. для решения этой проблемы были разработаны присадки (т.н. эпоксиды), предотвращающие образование кислот. Эти присадки даже при нормальной окружающей температуре реагируют с производными фосфорной кислоты, образуя вследствие разложения эфиров фосфорной кислоты, превращая их в безвредные нейтральные соединения.

В настоящее время в авиационных гидравлических системах сильные кислоты отсутствуют до тех пор, пока присадки, предотвращающие образование кислот не сработались практически полностью. Однако поскольку допустимое количество присадки, предотвращающей образование кислот в авиационной гидравлической жидкости ограничено, по соображениям набухания уплотнений и воспламеняемости, все товарные гидравлические жидкости типа НГЖ-4 и НГЖ-5у, а также упомянутые ранее их зарубежные аналоги, содержат одинаковые количества этой присадки, поскольку все товарные авиационные гидравлические жидкости содержат эфиры фосфорной кислоты, и все они, в сущности, содержат одинаковые количества присадки можно ли их считать одинаково стабильными? Ответ отрицательный. Потому что базовые компоненты этих жидкостей обладают различной стойкостью к гидролизу. Кроме того, для замедления скорости гидролиза могут применяться дополнительные вспомогательные присадки.

**Стойкость жидкости к гидролизу важна.** Если скорость подпитки жидкости недостаточна для сбалансирования скорости поглощения воды, то в конечном итоге в гидравлической системе могут образовываться сильные кислоты.

Кислотное число является критерием оценки содержания кислых соединений в жидкости. Его определяют титрованием. Единицей измерения является мг КОН, эквивалентный одному грамму испытуемой жидкости. Это маленькая единица измерения. Представим себе, что 0,5% воды, что довольно часто встречается в гидравлических системах самолетов, после полного гидролиза дает эквивалентное кислотное число 15,6 мг КОН, что показано следующим уравнением:

$$\begin{array}{rcc} 5 \text{ мг } \text{H}_2\text{O} & 56,1 \text{ (молекул.масса КОН)} & 15,6 \text{ мг КОН} \\ \text{-----} X & \text{-----} & \text{-----} ; \\ \text{г. жидк} & 18 \text{ (молекул.масса H}_2\text{O)} & \text{г. жидк.} \end{array}$$

В отсутствие присадок, предотвращающих образование кислот, достигаются очень высокие уровни сильных кислот (которые фактически достигались при применении жидкостей, разработанных в 50х г.г.).

Жидкость с высокой кислотностью, если таковая содержится в гидравлической системе самолета, вступает в реакцию с железом и алюминием, повреждая детали и образуя отложения и гели.

Свежая гидравлическая жидкость содержит, как правило, присадку, обладающую способностью нейтрализовывать продукты гидролиза при содержании примерно 0,4% воды (кислотное число эквивалентно приблизительно 13). Следовательно, жидкость обладает достаточно высокой способностью к предотвращению образования кислот. Однако, гидравлическая жидкость непрерывно поглощает воду из окружающей среды, и не редки случаи, когда концентрации воды превышают возможности присадки, предотвращающей образование кислот. Например, большинство производителей авиационной техники, допускают эксплуатацию самолетов с содержанием воды в гидравлической системе вплоть до 0,8%. Это основано на ожидании, что высокие концентрации сильной кислотности не возникнут до очередного отбора пробы жидкости, вследствие нормальной подпитки свежей жидкостью и, как правило, малой скорости гидролиза при умеренных температурах, типичных для гидравлических систем.

Для защиты от повреждения гидравлической системы вследствие высокой кислотности производители авиационной техники, как правило, рекомендуют максимальное кислотное число 1,5, выше которого жидкость подлежит замене. Время, которое требуется для достижения кислотного числа 1,5, может рассматриваться как срок службы жидкости. Предельное значение кислотного числа 1,5 является фактором защищенности от повреждения системы самолета. Серьезные повреждения начинаются при достижении кислотного числа выше 5, причем степень повреждения зависит от величины кислотного числа, продолжительности и температуры воздействия.

Современные гидравлические авиационные жидкости, содержащие в своем составе эпоксиды, имеют ресурс эксплуатации сотни, а иногда тысячи часов.

Основным недостатком жидкостей на основе эфиров фосфорной кислоты является ее высокая токсичность и химическая агрессивность.

В настоящее время передовыми мировыми компаниями, занимающимися производством гидравлических жидкостей для авиации, ведутся разработки новых классов синтетических гидравлических жидкостей, как на основе полиальфаолефинов (ПАОМ), так и новых классов органических негорючих основ, имеющих улучшенные характеристики по безопасности с точки зрения их меньшей токсичности по сравнению с используемыми в настоящее время, а также удовлетворяющих растущим эксплуатационным требованиям, предъявляемым к гидросистемам перспективных авиалайнеров.



## Литература

1. Яновский Л.С., Дмитриенко В.П. и др. Основы авиационной химмотологии.- М.: МАТИ, 2005.
2. Фуке И.Г., Спиркин И.Г., Шабалина Т.Н. Основы химмотологии. Химмотология в нефтегазовом деле: Учебное пособие.- М.:ФГУП Изд-во «нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина,2005.
3. Школьников В.М. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. 2-е изд.- М.: Издательский центр «Техноформ», 1999.
4. Глинка Н.Л. Общая химия: Учебное пособие для ВУЗов.- М.: Химия 2004
5. Адельсон С.В., Вишнякова Т.П., Паушкин Я.М. Технология нефтехимического синтеза, изд. 2е, переработанное –М.:Химия, 1985.
6. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. 2-е изд.- Баку,:Химия, 1985.
7. Аксенов А.Ф. Люлько В.И. - Вопросы авиационной химмотологии. Вып. 2. – Киев : изд. КИИГА, 1978.
8. Папок К.К. Химмотология топлив и смазочных масел. – М.: Воениздат, 1981.
9. Федоров М.И., Золотов В.А. Классификация и применение моторных масел. –М.: Диалог МГУ,1999.