



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и
наземного оборудования»

Учебное пособие

«Авиационные эксплуатационные материалы»
по дисциплине

«Эксплуатационные материалы»

Авторы
Годунова Л. Н.

Ростов-на-Дону, 2020

Аннотация

Данное учебное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Эксплуатационные материалы» по учебному плану для студентов направления 24.03.04 Авиастроение.

В пособии изложены основные положения теории и практики в изучении состава, методов получения, физико-химических и эксплуатационных свойств авиационных горюче-смазочных материалов. Основное внимание уделено авиатопливам для самолетов и вертолетов с газотурбинными двигателями. Существенный раздел пособия посвящен изучению эксплуатационных свойств авиационных масел и смазок, включая минеральные, синтетические масла и пластичные смазки. В заключительной части представлены краткие сведения по гидравлическим и противообледенительным жидкостям, достаточные для грамотной их эксплуатации при техническом обслуживании ВС.

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования»
Годунова Л.Н.



Оглавление

Введение	4
1. Авиационные топлива.....	4
1.1. Краткая характеристика состава АТ	4
1.1.1. Парафины.....	5
1.1.2. Циклопарафины (цикланы).....	6
1.1.3. Ароматические углеводороды (арены).....	7
1.2. Растворимые примеси	9
1.2.1. Кислородсодержащие примеси	10
1.2.2. Серо- и азотсодержащие примеси	11
2. Перегонка природного сырья – нефти в авиатопливо.....	11
2.1. Прямая перегонка нефти	11
2.2. Деструктивная переработка нефти и нефтепродуктов (крекинг)	13
2.3. Методы очистки топлива.....	14
3. Эксплуатационные свойства авиационных топлив.....	15
3.1. Теплота сгорания.....	15
3.2. Испаряемость топлива	18
3.3. Стабильность авиатоплив	21
3.4. Коррозионные свойства топлива.....	23
3.5. Низкотемпературные свойства	26
3.6. Растворимость воды в топливе	27
3.7. Загрязнение авиационных топлив	28
3.8. Нагарообразующие свойства топлив.....	29
3.9. Электризация топлива	30
3.10. Топливо для газотурбинных двигателей гражданской авиации	31
3.11. Биотопливо	36
3.12. Эксплуатационные свойства присадок к топливам	39
4. Авиационные масла. Смазки	41
4.1. Назначение, классификация смазочных материалов	41
4.2. Основные сведения о производстве и свойствах минеральных (нефтяных) и синтетических масел.....	42
4.2.1. Получение основ нефтяных масел	42
4.2.2. Химический состав минеральных масел	46
4.3. Синтетические базовые масла	48
4.4. Характеристика основных видов трения	52
4.5. Минеральные масла для авиационных двигателей.....	54
4.5.1. Масла для авиационных поршневых двигателей	54
4.5.2. Масла для турбореактивных двигателей.....	54
4.5.3. Масла для турбовинтовых двигателей	56
4.6. Нормирование эксплуатационных свойств и показателей качества смазочных масел	56
4.6.1. Вязкостные свойства масел	57
4.6.2. Смазочные свойства	60
4.6.3. Коррозионная стабильность масел	60
4.6.4. Стабильность масел.....	62
4.7. Синтетические масла	63
4.8. Пластичные смазки	67
4.8.1. Назначение, состав и структура пластичных смазок	67
4.8.2. Классификация пластичных смазок и требования к ним	69
4.8.3. Эксплуатационные свойства и показатели качества пластичных смазок.....	70
4.8.4. Стабильность смазок	71
4.8.5. Ассортимент и краткая характеристика пластичных смазок.....	72
4.8.6. Консервационные масла и смазки.....	74
5. Гидравлические жидкости	74
6. Антиобледенительные жидкости.....	78
Список Литературы	80

ВВЕДЕНИЕ

Данный курс предусматривает изучение состава, физико-химических и эксплуатационных свойств авиационных топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей, которые в совокупности принято называть единым термином "горюче-смазочные материалы" (ГСМ).

От качества ГСМ зависит надежность и экономичность работы двигателей и систем летательных аппаратов (ЛА).

Работники инженерно-авиационной службы (ИАС) несут непосредственную ответственность за проверку соответствия качества ГСМ требованиям нормативной документации, подготовку баков воздушных судов к приему авиаГСМ (слив и контроль отстоя).

Для успешной работы авиационному инженеру-механику необходимо иметь четкие представления о процессах, происходящих в топливах, маслах, смазках, спецжидкостях при их хранении, транспортировке, заправке соответствующих систем ЛА, а также в процессе эксплуатации их узлов и агрегатов.

Необходимо четко помнить, что качество ГСМ и их грамотная эксплуатация являются одним из главных составляющих обеспечения безопасности полетов.

1. АВИАЦИОННЫЕ ТОПЛИВА

Основное сырье для получения авиатоплив (АТ) – нефть.

1.1. Краткая характеристика состава АТ

АТ характеризуются элементарным и фазовым составом. Средний элементарный состав АТ представлен в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Элементарный состав АТ (% масс)

Углерод, С	Водород, Н	Кислород, О	Азот, N	Сера, S
80...87	12...16	0,1...0,3	0,03...0,7	0,001...0,01

Указанные элементы представлены в топливе в виде химических соединений органической и неорганической природы.

По фазовому составу АТ представляют собой гетерогенную коллоидную систему, состоящую из основной дисперсионной среды и дисперсных фаз.

Основная (жидкая) дисперсионная среда представляет собой смесь взаиморастворимых углеводородов различного состава и строения, а также органических соединений, содержащих серу, кислород, азот.

К дисперсным фазам относятся:

- твердая - твердые частицы различной природы (микрзагрязнения): пыль, почва, продукты износа и коррозии технологического оборудования, кристаллы льда;

- жидкая – микрокапли воды, образующие эмульсию воды в топливе;
- газовая – пузырьки газов, выделяющиеся по всему объему топлива при повышении температуры или понижении давления;
- биофаза – более 100 видов микроорганизмов и грибов.

Анализ состава основной дисперсионной среды

В данном подразделе рассмотрим основные свойства углеводов и растворимых примесей, входящих в состав основной среды.

Групповой состав углеводов, входящих в АТ, представляют: а)

парафины (алканы);

б) циклопарафины (цикланы);

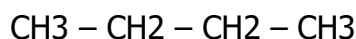
в) ароматические углеводороды (арены).

1.1.1. Парафины

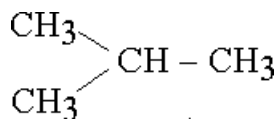
Парафинами называются углеводороды с открытой углеродной цепью, в молекулах которых атомы углерода всегда 4-валентны, связаны между собой одинарной ковалентной связью, а остальные валентности каждого атома насыщены атомами водорода. Парафины составляют гомологический ряд метана и имеют общую формулу C_nH_{2n+2} : CH_4 – метан; C_2H_6 – этан; C_3H_8 – пропан; C_4H_{10} – бутан; C_5H_{12} – пентан и т. д.

Различают парафины нормального строения и изомеры (изопарафины). Изомеры – углеводороды одинакового химического состава, но различного строения.

Первый изомер появляется у бутана



Н. – бутан

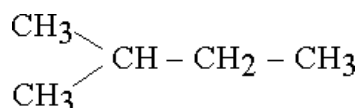


изобутан

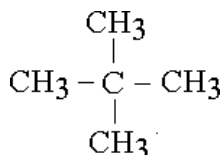
У пентана появляется уже 2 изомера



Н. – пентан



изопентан



тетраметилметан

По мере перехода к высшим членам ряда число изомеров быстро возрастает.

Парафины в большом количестве содержатся в нефти и в природном газе. Твердые парафины являются составной частью битумов, асфальтов, озокерита (горного воска).

При нормальных атмосферных условиях ($t_H = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_H = 760 \text{ мм рт. ст.}$) первые четыре члена парафинового ряда представляют собой газы (метан, этан, пропан, бутан); члены ряда с 5-го по 15-й – жидкости, с 16-го и выше – твердые вещества.

Краткая характеристика физических свойств парафинов представлена в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Физические свойства парафинов

Название	Химическая формула	Температура, $^\circ\text{C}$		Плотность, г/см^3 (при температуре $^\circ\text{C}$)
		плавления	кипения	
Метан	CH_4	-182,5	-161,6	0,416 (-161,6 $^\circ\text{C}$)
Этан	C_2H_6	-183,3	-88,6	0,546 (-88,6 $^\circ\text{C}$)
Пропан	C_3H_8	-187,6	-42,1	0,582 (-42,1 $^\circ\text{C}$)
Н. – бутан изобутан	C_4H_{10}	-138,3	-0,5	0,579 (-0,5 $^\circ\text{C}$)
	C_4H_{10} – –	-159,6	-11,7	0,559 (-11,7 $^\circ\text{C}$)
Н. – пентан изопентан	C_5H_{12}	-129,8	+36,0	0,626 (+20 $^\circ\text{C}$)
	C_5H_{12} – –	-159,9	+27,9	0,620 (+20 $^\circ\text{C}$)
Н. – гексан	C_6H_{14} 4	-95,3	+68,7	0,659 (+20 $^\circ\text{C}$)
Н. – гептан	C_7H_{16} 6	-90,6	+98,5	0,684 (+20 $^\circ\text{C}$)
Н. – октан	C_8H_{18} 8	-56,8	+125,7	0,703 (+20 $^\circ\text{C}$)

Из анализа физических свойств парафинов следует:

- чем выше номер парафина, тем выше его плотность и температура кипения;
- изомеризация парафинов снижает температуру плавления и кипения.

По химическим свойствам парафины характеризуются высокой стабильностью: при обычной температуре не окисляются и не реагируют с концентрированной серной кислотой, щелочами в водном растворе; не растворимы в воде.

1.1.2. Циклопарафины (цикланы)

Цикланы состоят из циклов, построенных из метиленовых групп ($-\text{CH}_2-$).

Общая формула циклоалканов C_nH_{2n} . Циклоалканы, содержащие пяти- и шестичленные циклы (циклопентан, циклогексан и их гомологи), составляют основную массу некоторых сортов нефти (например, бакинской).

Первые два члена циклоалканов (циклопропан и циклобутан) – газы, средние цикланы (до C_{15}) – жидкости, высшие (с C_{16}) – твердые вещества (табл. 1.3).

Циклоалканы в химическом отношении очень похожи на парафины. Они сравнительно малоактивны и склонны к реакциям замещения.

Таблица 1.3

Физические свойства цикланов

Название	Хим. формула	Температура, °С		Плотность, г/см ³ (в жидк. сост.)
		плавления	кипения	
Циклопропан	C ₃ H ₆	-128	-33	0,720
Циклобутан	C ₄ H ₈	-90	+13	0,704
Циклопентан	C ₅ H ₁₀	-93	+50	0,745
Циклогексан	C ₆ H ₁₂	+7,0	+81	0,779
Циклогептан	C ₇ H ₁₄	-8,0	+119	0,811
Циклооктан	C ₈ H ₁₆	+15	+151	0,836

Алкилирование циклопарафинов существенно понижает температуру их плавления и повышает температуру кипения (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Температуры фазовых переходов цикланов

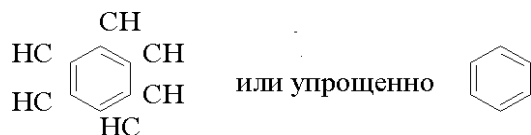
Название	Химическая формула	Структурная формула	Температура, °С	
			плавления	кипения
Циклопентан	C ₅ H ₁₀		-93	+50
Метилциклопентан	C ₅ H ₉ -CH ₃		-143	+72
Диметилциклопентан	C ₅ H ₈ -CH ₃ -CH ₃		-143	+105
Метилциклогексан	C ₆ H ₁₁ -CH ₃		-127	+101

1.1.3. Ароматические углеводороды (арены)

Арены – это производные бензола, имеющие общую химическую формулу C_nH_{2n-6} и содержащие устойчивую циклическую группировку (бензольное кольцо).

Основные методы получения аренов – сухая перегонка каменного угля (коксование) и нефтепереработка. Некоторые сорта нефти содержат до 60% ароматических углеводородов, которые выделяют простой перегонкой или каталитическим крекингом.

Родоначальником обширного ряда аренов является бензол C_6H_6 . Строение молекулы бензола обычно представляют циклической структурой, предложенной немецким химиком Кекуле (1865)



Физические свойства

Низшие члены гомологического ряда бензола – бесцветные жидкости, нерастворимые в воде, но хорошо – во многих органических растворителях. Горят ярким коптящим пламенем. С повышением молекулярной массы увеличивается температура кипения и плавления (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Основные физические свойства низших аренов

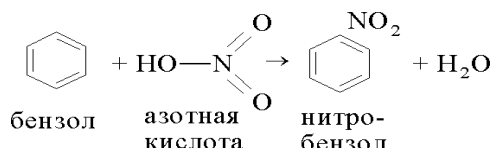
Название	Химическая формула и строение	Температура, $^{\circ}\text{C}$		Плотность, г/см^3
		плавления	кипения	
Бензол	C_6H_6 	+5,5	+80,1	0,879
Метилбензол (толуол)	$C_6H_5(CH_3)$ 	-95	+110,6	0,867
Диметилбензол (ксилол) орто-ксилол	$C_6H_4(CH_3)_2$ 	-25,2	+144,4	0,88
Мета-ксилол		-47,8	+139,1	0,864
Пара-ксилол		+13,2	+138,3	0,861
Этилбензол	$C_6H_5(C_2H_5)$ 	-95	+136	0,867

Химические свойства

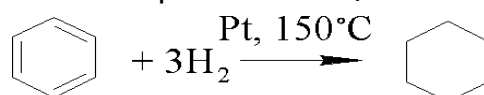
Из химических свойств аренов следует особенно отметить реакции замещения, а также некоторые реакции присоединения, протекающие в особых условиях, и реакции окисления. Однако при химических реакциях бензольное кольцо не разрушается.

Примеры реакций приведены ниже.

Реакция замещения (взаимодействие с кислотами)

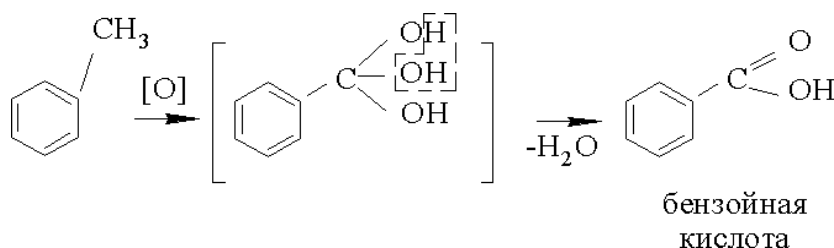


Реакция присоединения. Эти реакции не характерны для бензола и протекают только в особых условиях (высокая температура, облучение УФО, катализатор). Например, в присутствии катализатора (платина, никель или палладий) бензол вступает в реакцию гидрирования с образованием циклогексана

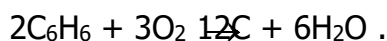


Реакции окисления

Бензол очень устойчив к действию окислителей. В то же время гомологи бензола окисляются легко. При этом окислению подвергается боковая цепь; вместо неё образуется карбоксильная группа:



На воздухе бензол горит коптящим пламенем



В связи с низким отношением (H/C) содержание аренов в авиационных топливах ограничено до 20...25%.

1.2. Растворимые примеси

Как было отмечено выше основная дисперсионная среда помимо взаиморастворимых углеводородов содержит растворимые примеси, к которым относят O-, S-, N- содержащие органические соединения и непредельные углеводороды.

1.2.1. Кислородсодержащие примеси

К ним относят спирты, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты.

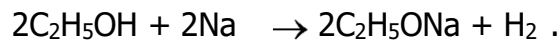
Спирты (алкоголи)

Алкоголь – углеводород, в котором атом водорода замещён на гидроксил (-ОН).

По числу гидроксильных групп спирты подразделяются на:

- одноатомные (R-OH);
- двухатомные (OH-R-OH) – гликоли;
- трехатомные – глицерин.

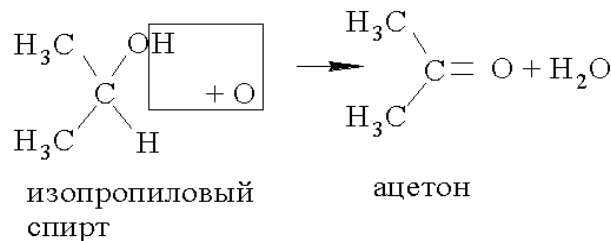
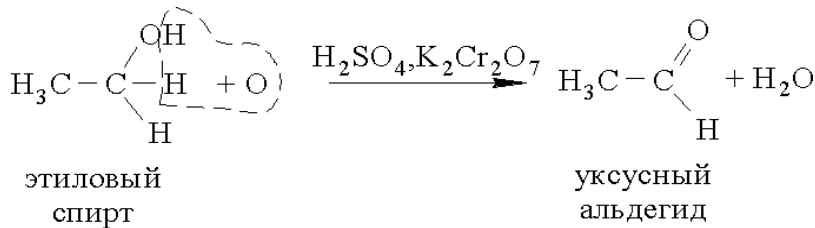
Спирты взаимодействуют с металлами, образуя алкоголяты



алкоголят натрия

Алкооляты – твердые, неустойчивые вещества, легко подвергающиеся гидролизу. Они образуются и при действии таких металлов, как магний, алюминий, цинк, и являются одной из причин забивки топливных фильтров авиадвигателей.

Предельные спирты легко окисляются. Основная причина этому – гидроксильная группа. При окислении первичных спиртов образуются альдегиды, а при окислении вторичных – кетоны:



Альдегиды и кетоны окисляются до органических кислот.

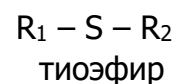
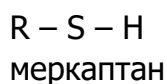
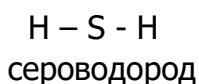
Таким образом, конечным результатом содержания кислородсодержащих примесей в авиационном топливе является повышение содержания органических кислот и нерастворимых примесей.



1.2.2. Серо- и азотсодержащие примеси

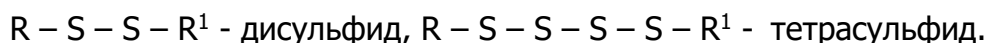
Непредельные углеводороды

Из серосодержащих веществ в нефти находятся меркаптаны. Меркаптаны и тиоэфиры – производные сероводорода, в молекуле которого один или оба атома водорода замещены углеводородными радикалами:



Кроме меркаптанов в нефти присутствуют сульфиды, для которых характерна функциональная группа – S - (сульфидная, тиоэфирная).

Могут присутствовать также дисульфиды и полисульфиды, в молекулах которых содержатся два и более атомов серы:



Из азотсодержащих соединений в нефти находятся, главным образом, алкилированные пиридины и хинолины.

Вредное влияние серо- и азотсодержащих соединений связано с тем, что они являются коррозионными агентами, а также инициаторами окисления и смолообразования в топливах (раздел 3.4).

Непредельные углеводороды (олефины) – это углеводороды, в молекулах которых атомы углерода связаны между собой одной или несколькими двойными связями. Например: $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ – этилен.

Гомологический ряд олефинов представлен формулой C_nH_{2n} .

Олефины загрязняют авиатоплива в процессе их получения из нефти. Они исключительно реакционно-способны за счет наличия в молекулах двойной связи. Характерны реакции присоединения других атомов или групп в результате разрыва п-связи.

Олефины являются инициаторами окисления топлив, образования смол, нерастворимых осадков и нагара. По этой причине они удаляются из топлив в процессе его кислотной очистки.

Качественная реакция на присутствие непредельных углеводородов – обесцвечивание бромной воды. Количественно остаточное содержание олефинов в топливе оценивается йодным числом.

2. ПЕРЕГОНКА ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ – НЕФТИ В АВИАТОПЛИВО

Основными способами получения авиатоплив из нефти является прямая перегонка (дистилляция) и деструктивная переработка (крекинг).

2.1. Прямая перегонка нефти

Прямая перегонка – наиболее простой и старый способ перегонки нефти. На рис. 2.1 приведена принципиальная схема установки с многократным испарением всей отгоняемой части нефти в одной ректификационной колонне с

одновременным отбором и конденсацией пара с нескольких точек по высоте колонны.

Нефть центробежным насосом 5 подается под давлением последовательно через три дистиллятных теплообменника 4, грязеотделитель 6, мазутные теплообменники 7 и, нагретая до 170...180°C, поступает в трубчатую печь 1. Нагретая в печи до 350°C в виде двухфазной среды (пар + жидкость) нефть поступает в ректификационную колонну 2.

Колонна представляет собой цилиндр с рядом расположенных друг над другом горизонтальных площадок (так называемых тарелок) 18. Каждая из площадок снабжена паровым патрубком 16, колпачком 14, переливной трубой 13, сливным порогом 15.

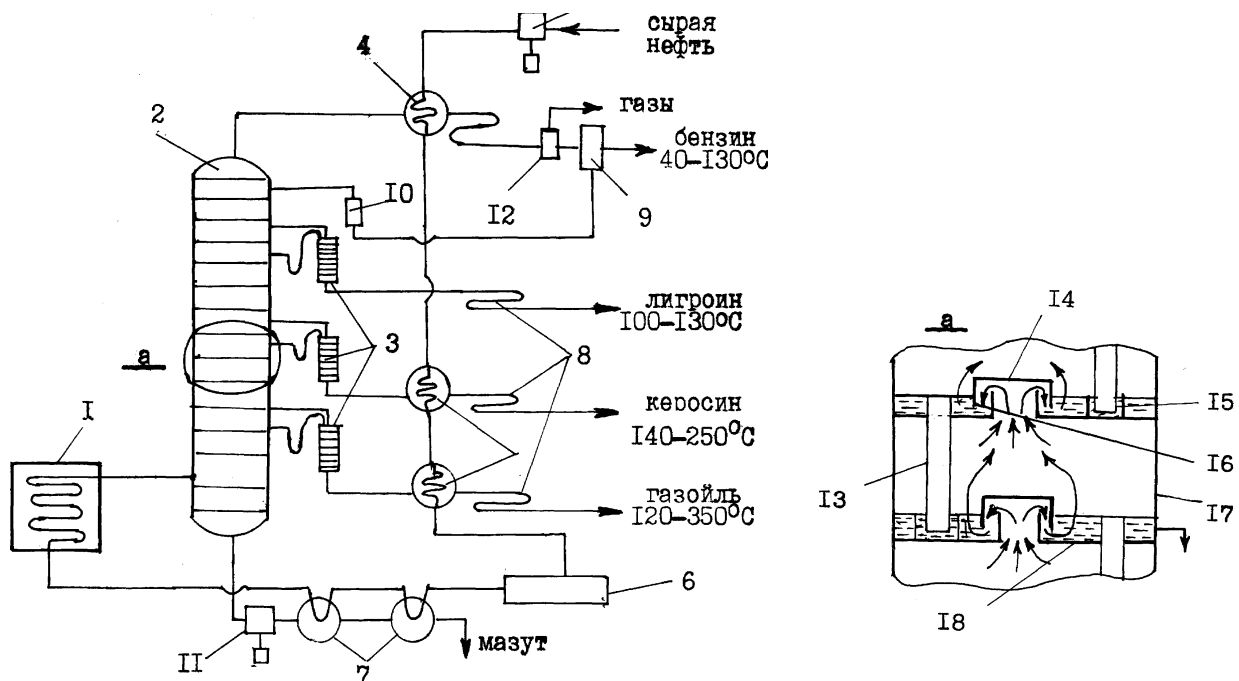


Рис. 2.1. Принципиальная схема установки прямой перегонки:

- 1 - трубчатая печь; 2 - ректификационная колонна; 3 - выносные отпарные секции; 4 - теплообменник; 5 - центробежный насос; 6 - грязеотделитель; 7 - теплообменник; 8 - холодильник; 9 - приемник; 10,11 - насос; 12 - газосепаратор; 13 - переливная трубка; 14 - колпачок; 15 - сливной порог; 16 - паровой патрубок; 17 - обечайка; 18 - тарелка

Жидкость двухфазной среды заполняет тарелку и стекает через переливную трубку 13 на нижерасположенную тарелку. На каждой из тарелок жидкость встречается с поднимающимся вверх паром, который просачивается (пробулькивает) через раствор, проходя паровые патрубки 16 в зазор между патрубками и колпачками 14, обеспечивающими контакт между паром и жидкостью. При этом часть менее летучего (тяжелого) компонента конденсируется из пара в жидкость, часть летучего - переходит из жидкости в пар. В результате пар, подходящий к паровому патрубку вышерасположенной

тарелки, оказывается обогащенным более легкими компонентами по сравнению с паром, поступающим с нижних тарелок, а жидкость, стекающая на расположенную ниже тарелку через переливную трубку 13, обогащена более тяжелым компонентом по сравнению с жидкостью, поступающей с выше расположенной тарелки. Этот процесс повторяется на каждой тарелке и, в результате, при применении колонны с достаточным количеством тарелок и правильной регулировке режима работы и мест отбора по высоте колонны становится возможным получение заданных фракций перегонки нефти.

С верха колонны отбираются пары бензина, которые охлаждаются и конденсируются в теплообменнике 4 и холодильнике 8. Проходя через газосепаратор 12 бензин поступает в приемник 9, из которого часть бензина отбирается насосом 10 для орошения колонны.

С бока колонны после прохождения через выносные отпарные секции 3, теплообменники 4 и холодильники 8 отбирают боковые погоны – лигроин, керосин, газойль.

Мазут с низа колоны прокачивается насосом 11 через теплообменник 7 в мазутоприемник.

В зависимости от марки нефти выход светлых продуктов прямой перегонки может достигать 50%, в том числе бензиновой фракции – 20...25%, керосиновой – 15...20%, дизельного топлива – 5...7%.

2.2. Деструктивная переработка нефти и нефтепродуктов (крекинг)

Для увеличения выхода авиатоплив используется более совершенная (по сравнению с прямой перегонкой) технология переработки нефти, а также химические превращения высококипящих фракций нефти в дефицитные фракции.

Таковыми методами являются термический крекинг, каталитический крекинг, риформинг, гидрокрекинг.

Крекингом принято называть процесс расщепления высокомолекулярных углеводородов, находящихся в тяжелых фракциях нефти, на более легкие под действием температуры, давления и катализаторов.

Термический крекинг осуществляется при нагревании мазута до температуры 500⁰С и давления 40..50 атм. Продуктами крекинга является крекинг-бензин, выход которого достигает от 30% до 70%. Крекинг легкого сырья (керосина, газойля) проводится с целью получения высокооктановых бензинов.

Каталитический крекинг отличается от термического тем, что в этом случае процесс расщепления протекает с участием различных катализаторов, которые ускоряют и направляют ход реакции, снижают температуру и давление процесса.

Промышленный каталитический крекинг проводят на 50...70⁰С ниже термического, при более низком давлении (2..3 атм.) и только в паровой фазе. В качестве катализаторов применяют дешевые алюмосиликаты ($4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), силикаты магния и другие, способствующие расщеплению. Чтобы катализировать

изомеризацию, циклизацию и дегидрирование к кислым катализаторам добавляют окисные катализаторы некоторых металлов (Al, Mo, Cr). Эти же катализаторы способствуют превращению серосодержащих соединений в сероводород.

Каталитический крекинг, протекающий с применением платиновых и окисных катализаторов, носит название **риформинга**.

Риформинг используют для облагораживания низкооктановых бензинов. В процессе риформинга парафины изомеризуются и частично расщепляются. Побочным продуктом является водород.

Разновидностью риформинга являются **гидроформинг** и **платформинг**.

Гидроформинг представляет собой каталитический крекинг с присутствием водорода под давлением 20...35 атм., при температуре 430...530⁰С на окисных катализаторах. Гидроформинг применяется для улучшения антидетонационных свойств бензинов и лигроинов.

Платформинг заключается в обработке бензиновых фракций водородом над платино-глинозёмными катализаторами при температуре 500⁰С и давлении водорода 50 атм. При этом высшие парафины изомеризуются и расщепляются. Нормальные парафины превращаются в ароматические соединения, а все серосодержащие соединения восстанавливаются до сероводорода. Октановое число бензинов повышается до 80.

Гидрокрекинг заключается в обработке тяжелых остатков прямой перегонки с температурой выкипания 350...600⁰С водородом при давлении 110 атм., температуре 400⁰С с применением комбинированных катализаторов (алюмо-никель-молибденовый, алюмо-кобальт-молибденовый). Этот процесс является наиболее прогрессивным для получения реактивных топлив и позволяет получать до 60...80% топлива от исходного сырья.

2.3. Методы очистки топлива

Топлива для авиационных поршневых и реактивных двигателей не должны содержать ненасыщенных соединений, склонных к полимеризации и образованию каучукоподобных веществ. Вредными являются серосодержащие соединения и, особенно, меркаптаны и сероводород, так как их наличие способствует интенсивному протеканию коррозионных процессов. Должны быть удалены и нормальные высшие парафины, способные к кристаллизации при положительных температурах, а также часть ароматических соединений. Поэтому нефтяные дистилляты, идущие на получение топлив, подвергаются различным видам обработки с целью удаления примесей.

Кислотная очистка заключается в обработке дистиллятов топливных фракций 80..86% H₂SO₄, при этом сернистые, кислородные и азотистые соединения образуют с водным раствором H₂SO₄ прочные соединения и извлекаются из дистиллятов; удаляются также все непредельные углеводороды и часть ароматических.

Щелочная промывка включает обработку топливных дистиллятов 1...3% водным раствором NaOH. Такой метод очистки применяется для

извлечения сероводорода, образовавшегося при разложении сернистых соединений в процессе перегонки нефти. Кроме того, при щелочной промывке удаляются меркаптаны и органические кислоты.

После кислотной и щелочной очисток дистилляты отмываются водой до нейтральной реакции среды.

Очистка отбеливающими землями заключается в пропускании паров бензина через слой пористой земли. Действие отбеливающих земель приводит к ускорению полимеризации непредельных углеводородов.

Очистка хлористым цинком, плюмбитом натрия применяется для удаления из топлива меркаптанов.

3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ

К эксплуатационным свойствам принято относить следующие: теплоту сгорания, испаряемость, вязкость, стабильность, коррозионные свойства, низкотемпературные свойства, воспламеняемость, электризацию.

Дадим краткую характеристику каждому из указанных свойств.

3.1. Теплота сгорания

Для оценки эффективности топлива большое значение имеют теплота сгорания, потребное количество окислителя, объём и температура продуктов сгорания.

Горение топлива – это цепная химическая реакция окисления топлива кислородом воздуха, в ходе которой химическая энергия превращается, в основном, в тепловую с образованием газообразных продуктов реакции.

Топливная смесь находится в камере сгорания двигателя всего 0,002...0,01 секунды. За это время должны быть завершены все подготовительные процессы и собственно процесс горения. Подготовительные процессы заключаются в распылении, испарении и перемешивании паров горючего с окислителем. Одновременно с физической подготовкой протекает химическая подготовка смеси, заключающаяся в протекании начальных предпламенных реакций между молекулами горючего и окислителя, приводящих к образованию различного рода активных частиц – свободных радикалов.

Подробно физико-химические особенности процесса горения рассматриваются при изучении дисциплины “Теория горения и взрыва”.

Остановимся на определении теплоты сгорания.

Различают высшую и низшую теплоты сгорания.

Высшая теплота сгорания (H_0) – количество тепла, выделяемое при сгорании 1кг (или 1л) топлива с учётом теплоты конденсации водяного пара при стандартной температуре.

В двигателях продукты сгорания не охлаждаются до начальной температуры и уносят с собой часть тепла (например, тепло конденсации паров воды, образовавшихся при горении водорода топлива), поэтому принято

различать две теплоты сгорания: высшую (H_o) и низшую ($H_{и}$). Низшая теплота сгорания меньше высшей на величину теплоты конденсации паров воды. Эта теплота составляет примерно 2,5 МДж на 1 кг воды.

$$H_{и} = H_o - 2,5W, \text{ МДж/кг},$$

где W - количество воды, образуемой при сгорании 1 кг топлива.

Его легко определить по содержанию водорода в топливе $W=9[H_T]$, где $[H_T]$ – массовая доля водорода в топливе.

Для авиационных бензинов и керосинов, имеющих $[H_T]=0,13...0,15$ (кг водорода/кг топлива), $W=1,15...1,35$ (кг воды/кг топлива).

Следовательно, теплота конденсации паров воды составляет $2,5*W=2,9...3,4$ (МДж/кг топлива).

Теплота сгорания углеводородного топлива известного состава C_nH_m может быть определена с помощью закона Гесса по тепловым эффектам реакции разложения топлива на углерод и водород и затем раздельного сгорания этих простых веществ с образованием CO_2 и H_2O .

Затраты энергии на разложение топлива равна стандартной теплоте его образования - энтальпии i_T одного килограмма топлива.

Низшая теплота сгорания и теплота образования (энтальпия) некоторых топлив представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Низшая теплота сгорания и теплота образования (энтальпия) некоторых топлив.

Плотность топлив

Наименование топлива	H_u , МДж/кг	i_T , МДж/кг при 293 К	ρ , кг/м ³
Парафины C_nH_{2n+2} (среднее значение $n=5...18$)	44,0	-2,1	700
Нафтены, олефины C_nH_{2n} (среднее значение $n=5...18$)	43,6	-1,7	750
Ароматические углеводороды C_nH_{2n-6} (среднее значение $n=7...10$)	41,1	-0,6	850
Бензины (керосины) (среднее значение)	43,4	-1,9	715(778)
Метан CH_4 жидкий при температуре кипения 111,4 К	49,6	-5,28	422
Метан CH_4 газ	50,2	-4,65	0,716
Метиловый спирт CH_3OH	19,9	-7,45	793
Этиловый спирт C_2H_5OH	26,7	-6,08	789
Водород жидкий при температуре кипения 20К	116,3	-4,61	70,8
Водород газ	120,4	0	0,0846
Углерод - графит твердый	32,8	0	2250
Бериллий	66,6	0	1855
Бор	58,6	0	2300

Стандартная теплота разложения (образования) керосинов и бензинов равна

$$i_T, = -1,9 \text{ МДж/кг} .$$

Теплота сгорания углерода с образованием CO_2 составляет 32,8 МДж/кг углерода. Для водорода - 120,4 МДж/кг водорода. Следовательно, выражение для низшей теплоты сгорания $H_{и}$ будет иметь вид

$$H_{и}=32,8[C_T]+120,4[H_T]+i_T, \text{ МДж/кг},$$

где $[C_T]$ – содержание углерода в (кг/кг топлива);
 $[H_T]$ - содержание водорода в (кг/кг топлива).

Пример

Определить низшую теплоту сгорания метана CH_4 , энтальпия которого равна $i_T=-4,65$ КДж/кг.

Определим $[C_T]$ и $[H_T]$:

$$[C_T]=\frac{12,011*1}{12,011*1+1,008*4}=0,749 \frac{\text{кг}}{\text{кг топлива}} \text{ углерода};$$

$$[H_T]=\frac{1,008*4}{12,011*1+1,008*4}=0,151 \frac{\text{кг}}{\text{кг топлива}} \text{ водорода} .$$

Тогда $H_{и}=32,8*0,749+120,4*0,151-4,65=38,09$ МДж/кг.

Располагаемый запас энергии в баках ВС, т.е. максимальное количество тепла, которое может быть получено за счет сгорания топлива, равно произведению объема баков V на плотность топлива ρ и на его теплоту сгорания $H_{и}$.

Энергоемкость топлива (H_V) – количество тепла, выделяемое при сгорании 1 м³ топлива. В ряде пособий энергоемкость называют *удельной объемной теплотой сгорания*. Оно равно произведению удельной массовой теплоты сгорания $H_{и}$ на плотность топлива ρ

$$H_V=H_{и}*\rho,$$

где H_V – объемная удельная теплота сгорания, МДж/ м³; $H_{и}$ – удельная массовая теплота сгорания, МДж/кг;

ρ – плотность топлива $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Для самолетов определяющим показателем является объемная теплота сгорания, т.к. объем баков ВС ограничен.

Пример

Сравнить удельную массовую $H_{и}$ и объемную H_V теплоты сгорания газообразного и жидкого водорода:

- газообразный водород $H_{и}=120 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$;

- плотность газообразного водорода $\rho = 0,0846 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- жидкий водород ($t=20\text{К}$) $H_{и} = 116 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$;
- плотность жидкого водорода ($t=20\text{К}$): $\rho = 70,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Для жидкого водорода

$$H_V = H_{и} * \rho = 120 * 0,0846 = 10,15 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$$

Данные табл. 3.1 показывают, что наибольшей массовой теплотой сгорания обладает водород, наименьшей – углерод.

Ароматические углеводороды (арены) по сравнению с алканами и цикланами обладают наименьшей массовой теплотой сгорания, но наибольшей – объемной.

Анализ табл. 3.1 позволяет также сформулировать пути повышения теплоты сгорания топлив:

- увеличение содержания водорода в топливе за счет гидрирования ароматических углеводородов;
- изомеризация нормальных парафинов, позволяющая расширить диапазон температур жидкого состояния высокономерных парафинов;
- алкилирование циклановых углеводородов;
- добавка в топливо высокоэнергетических компонентов на основе металлоорганических соединений из группы производных бора, бериллия, магния и алюминия.

3.2. Испаряемость топлива

Испаряемость топлива является одной из главных эксплуатационных характеристик, влияющих на лёгкость запуска двигателя, полноту сгорания, нагарообразование. Испаряемость вызывает потери топлива при хранении на складах ГСМ и в высотных полётах, а так же может быть причиной кавитации в топливной системе и отказа двигателя.

Испарение – это процесс перехода вещества из жидкого или твёрдого состояния в газообразное.

Наиболее интенсивен процесс испарения при кипении жидкости. Каждое химическое вещество кипит при определённой температуре, представляющей физическую константу этого вещества.

Авиационное топливо по химическому составу представляет собой смесь взаиморастворимых углеводородов, выкипающих в определённом диапазоне температур. Поэтому испаряемость топлива зависит от химического состава и может быть оценена по кривой фракционной разгонки.

Экспериментально кривую фракционной разгонки получают путём перевода топлива в пар и последующей конденсации паров с одновременной

регистрацией температуры пара и объемного процента отогнанной фракции (рис. 3.1).

В технических условиях на авиационное топливо кривая фракционной разгонки задаётся в табличном виде. При этом выделяются следующие её характерные точки: t_n - температура начала перегонки; t_{10} , t_{50} , t_{90} , t_{98} – температуры выкипания 10 ; 50 ; 90 ; 98 топлива соответственно.

Между указанными точками кривой фракционной разгонки и эксплуатационными характеристиками двигателя и топливной системы имеется определённая связь.

Температура t_n определяет потери топлива на испарение при хранении в резервуарах складов ГСМ и при высотных полётах. Чем ниже t_n , тем эти потери больше. Кроме того, температура t_n характеризует условия возникновения кавитации (холодного кипения). Кавитация возникает при падении давления в жидкости ниже давления насыщенных паров и растворенных газов. Обычно кавитация возникает на входе в насос, где имеется разрежение, и вероятность её появления наибольшая.

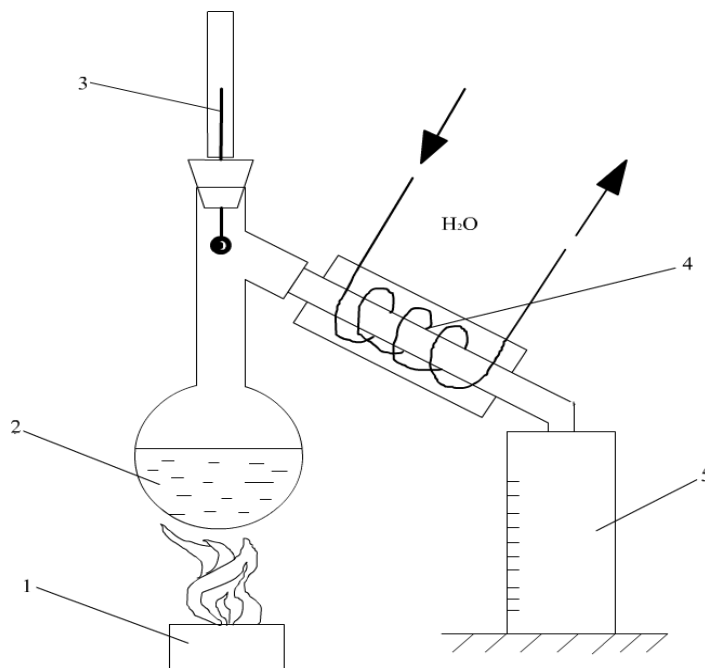


Рис. 3.1. Схема установки для получения кривой фракционной разгонки:
1 - нагреватель; 2 - колба с топливом (100 мл); 3 - термометр; 4 - холодильник; 5 - мерный цилиндр

Результаты испытаний изображают в виде графика зависимости температуры кипения от процента выкипания (рис. 3.2).

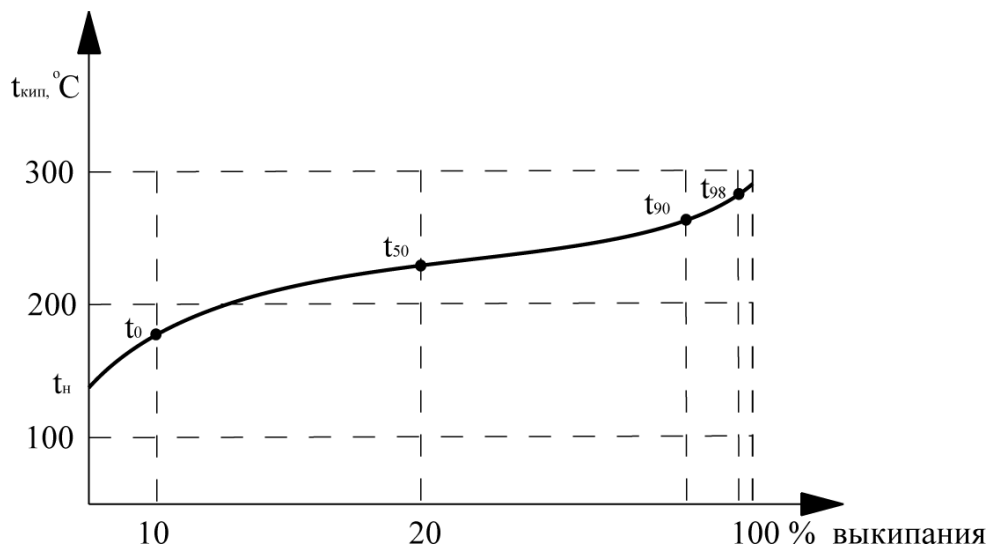


Рис. 3.2. Примерная кривая фракционной разгонки керосина ТС-1

Чем ниже t_n , тем раньше возникает кавитация при высотных полётах. При её возникновении подача топлива в двигатель практически прекращается и происходит отказ двигателя.

Температура t_{10} – характеризует пусковые свойства двигателя на этом топливе. Чем ниже эта температура, тем быстрее испаряется и воспламеняется топливо–воздушная смесь, тем легче запускается двигатель.

Для облегчения запуска ГТД при отрицательных температурах иногда применяют специальные пусковые топлива с пониженным значением t_n . Так на самолётах Ту-104 для запуска двигателя РД-3М-500 в качестве пускового топлива используют бензин Б-70 с добавкой 1 масла МК-8_{г/о}

Температура t_{50} характеризует быстрый прогрев двигателя после запуска и его приёмистость.

Приёмистость – это свойство двигателя переходить с режима минимальной мощности (малый газ) на максимальный (взлётный) режим. Приёмистость характеризуется временем. Время приёмистости газотурбинных двигателей составляет 8...10 с, поршневого двигателя 1...2 с. Чем ниже t_{50} , тем приёмистость лучше (а время – меньше).

Температуры t_{90} и t_{98} характеризуют содержание высокомолекулярных углеводородов и соответственно полноту сгорания топлив.

Чем выше эти температуры, тем труднее испаряются тяжелые фракции топлив, ниже полнота сгорания, выше дымление, саже- и нагарообразование.

Таким образом, повышение испаряемости топлива имеет свои преимущества и недостатки.

Преимущества: облегчается запуск двигателя; повышается полнота сгорания топлива; расширяются пределы устойчивого горения топливо – воздушной смеси.

Недостатки: возрастают потери топлива на испарение при эксплуатации и хранении; понижается высотность топливной системы вследствие

возникновения кавитации; ухудшаются условия работы топливных насосов и возрастает их износ.

В то же время, снижение испаряемости топлива приводит к ухудшению пусковых свойств двигателя, увеличению нагарообразования.

Состав применяемого топлива зависит от типа двигателя, высоты и скорости полёта самолёта.

Для сверхзвуковых самолётов типа Ту-144 применяют тяжёлые топлива Т-6 и Т-8В. Для дозвуковых газотурбинных самолётов (типа Ил-86, Ил-62, Ту- 204, Ил-114 и др.) применяют керосины ТС-1 и РТ. Эти топлива являются взаимозаменяемыми; разрешается заправка и дозаправка самолёта любым из этих топлив, а также их смесями.

Для самолётов с поршневыми двигателями (Ан-2, Ил-14, Як-18Т) применяются бензины марок Б-91/115 и Б-95/130, в обозначении которых первая цифра обозначает октановое число, вторая – сортность.

3.3. Стабильность авиатоплив

Под стабильностью топлив понимается их способность сохранять постоянным химический состав и физические свойства в процессе хранения, транспортировки и подачи в камеру сгорания двигателя.

При длительном хранении углеводородные топлива подвергаются автоокислению. Скорость процесса автоокисления тем выше, чем выше температура топлива и содержание кислорода в надтопливном пространстве.

В результате автоокисления топлива образуются альдегиды, кетоны и органические кислоты, приводящие к появлению в топливе смолистых веществ, образующих жидкие и твёрдые осадки.

Наиболее устойчивы к окислению алканы (парафины) и циклоалканы, наименее – непредельные и ароматические углеводороды. При окислении непредельных углеводородов помимо спиртов, альдегидов и кислот образуются значительные количества полимерных и смолоподобных веществ.

К факторам, определяющим стабильность авиатоплив, следует отнести: температуру хранения; содержание воды и механических примесей; кислотность топлива; содержание непредельных углеводородов; каталитическое действие металлов; содержание серы; время хранения.

Оценка стабильности авиатоплив производится по наличию в нем фактических смол, по показателю термической стабильности.

Фактические смолы – это продукты, которые остаются в виде твёрдого или полужидкого осадка в стеклянном стакане после быстрого и полного выпаривания из него топлива. В основном, это смолы, которые находились в топливе в растворённом состоянии, а также смолы, образовавшиеся в процессе проведения опыта.

Выпаривание керосинов проводят при $t=180\text{ C}$, бензинов – при 150 C , т.е. при температурах наиболее интенсивного окисления углеводородов, входящих

в состав этих топлив. Выпаривание проводят либо в воздушном потоке, либо под струёй водяного пара.

Содержание образовавшихся фактических смол определяется по формуле

$$\chi = [(G_2 - G_1) * 100] / 25,$$

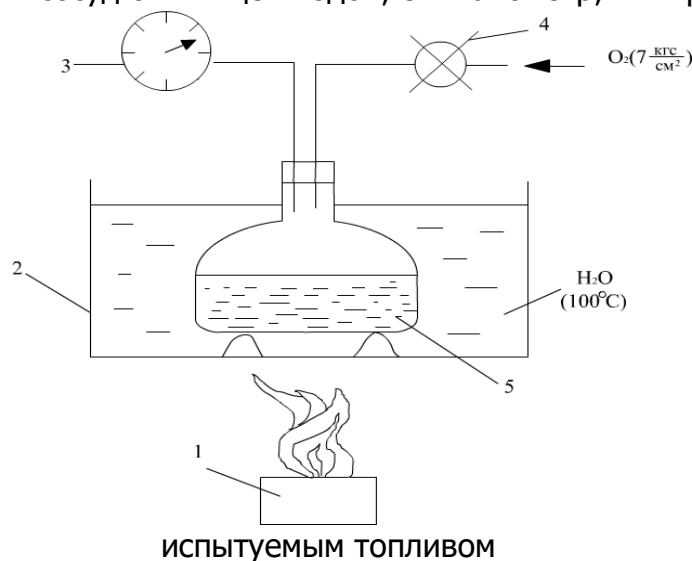
где χ - количество фактических смол в мг/100 мл топлива; G_1 – масса чистого сухого стакана, мг;
 G_2 – масса стакана со смолами, мг; 25 –
 объем испытуемого топлива, мл.

Индукционный период – это время (мин.) до начала интенсивного окисления 100 мл топлива при выдержке его при $t=100$ С и давлении кислорода над топливом $p=7$ кгс/см².

Схема испытания приведена на рис. 3.3. 100мл топлива наливают в стеклянную колбу, которую погружают в сосуд с кипящей водой. В колбу предварительно подают кислород под давлением 7кгс/см² и закрывают кран 4. Колбу выдерживают в кипящей воде до падения давления кислорода, фиксируемого по манометру 3. Падение давления свидетельствует о резком увеличении скорости окисления топлива и образования смол. Чем больше индукционный период, тем более длительно можно хранить топливо, тем стабильнее его свойства при прокачке по топливной системе, тем меньше количество осадков при повышенных температурах.

Рис. 3.3. Схема установки по определению индукционного периода:

1 - нагреватель; 2 - сосуд с кипящей водой; 3 - манометр; 4 – кран; 5 - колба с



Термическая стабильность определяется по количеству мг осадка на 100 мл топлива, образующегося на бумажном фильтре после нагрева 50 см³ топлива при температуре 150 С в течение 4 часов в присутствии каталитической меди и последующей фильтрации охлажденного топлива.

Термостабильность характеризует эксплуатационные свойства при повышенных температурах, например, в механизмах управления створками

регулируемого сопла при $t=180^{\circ}\text{C}$, в топливных коллекторах форсажных камер, обдуваемых горячими газами при $t=600\text{...}800\text{ C}$. ◦

Конструкционные материалы – металлы агрегатов топливной системы оказывают каталитическое (ускоряющее) действие на процессы окисления топлив и образование в них нерастворимых смолистых соединений, особенно при повышенных температурах.

По интенсивности окисления металлы можно расположить в ряд $\text{Pb}>\text{Cu}>\text{Sn}>\dots>\text{Fe}>\text{Al}$, т.е. наибольшим каталитическим эффектом обладают свинец и медь, наименьшим - железо и алюминий.

Ингибирующее (защитное) действие на окисление реактивных топлив оказывают металлы



Термоокислительная стабильность снижается в присутствии сернистых соединений, особенно, меркаптанов. В их присутствии снижается индукционный период, образуются нерастворимые продукты окисления. Это обстоятельство заставляет снижать максимальную эксплуатационную температуру прямогонных топлив типа ТС-1 до $100\text{...}120\text{ C}$.

Гидроочищенные и гидрированные топлива (РТ, Т-6, Т-8В) с высокой степенью очистки от сернистых соединений и непредельных углеводородов можно применять при $t=330\text{...}350\text{ C}$, не опасаясь образования большого количества нерастворимых осадков.

Нежелательные последствия термоокисления топлива связаны с нарушением теплопередачи и перегревом масла в топливо–масляном радиаторе, забивкой фильтров, отложениями на деталях топливных насосов, изготовленных из сплавов, содержащих медь, свинец.

3.4. Коррозионные свойства топлива

Коррозия – это разрушение металлов и сплавов под действием окружающей среды. Коррозия обычно начинается на поверхности металла и в дальнейшем распространяется внутрь, существенно изменяя исходные прочностные свойства металлов.

Из химических соединений, входящих в состав топлив, наибольшей агрессивностью обладают соединения, содержащие меркаптановую серу (метилмеркаптан, этилмеркаптан, пропилмеркаптан), сероводород и свободная сера. Такие серосодержащие соединения, как тиофены, дисульфиды и др. не являются коррозионно-агрессивными веществами, но их содержание в топливе должно быть минимальным, чтобы уменьшить загрязнение атмосферы.

Из других органических соединений, которые являются коррозионно-агрессивными компонентами, следует отметить органические кислоты и щелочи, а также нерастворенную воду.

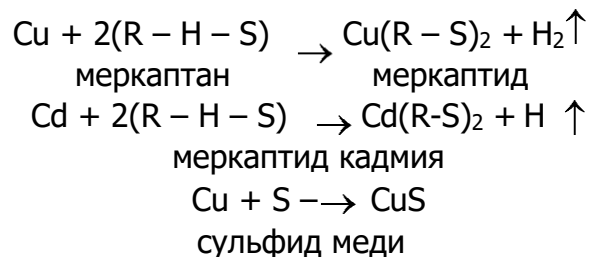
Процессы коррозии деталей и агрегатов самолетных систем, контактируемых с топливом и продуктами его сгорания, подразделяются на два

типа: жидкофазную коррозию, протекающую в жидкой среде, и высокотемпературную или газовую коррозию, протекающую при высоких температурах в среде продуктов сгорания.

Жидкофазная коррозия по механизму разрушающего действия подразделяется на химическую, электрохимическую и биохимическую.

Химическая коррозия имеет место непосредственно на участках контакта топлива с материалами деталей и агрегатов топливной системы и осуществляется за счет химического взаимодействия металла конструкции с коррозионно-активной средой в топливе, в качестве которой выступают сернистые соединения, а также минеральные и органические кислоты.

Наиболее часто химической коррозии подвергаются детали топливных агрегатов из сплавов меди, имеющие кадмиевое покрытие, свинец, цинк и другие сплавы. Указанные металлы, взаимодействуя с меркаптанами, образуют меркаптиды, с серой – сульфиды:



Образовавшиеся продукты реакции легко отделяются от поверхности металла и разносятся по топливной системе, засоряя фильтры и ухудшая работу топливорегулирующей аппаратуры.

Ввиду коррозионной активности сернистых соединений их содержание в топливе ограничивается. Так для топлива РТ содержание серы может быть не более 0,1%, в том числе меркаптановой – не более 0,001%.

Окисление углеводородов топлива, идущее наиболее интенсивно при повышенных температурах, приводит к значительному возрастанию кислотности топлива. Образовавшиеся органические кислоты и другие кислые продукты при взаимодействии с металлами образуют мыла, способные засорять топливные фильтры и тонкие щелевые каналы агрегатов. Кроме того, кислые соединения, образующиеся в топливе, размягчают и разрушают герметики кессон-баков, уплотнительные резиновые прокладки, манжеты плунжерных насосов и других резиновых деталей.

Электрохимическая коррозия имеет место при воздействии на металлы (сплавы) растворов электролитов или влажных газов. При этом одновременно происходят два процесса – окислительный и восстановительный, сопровождающиеся перемещением электронов в металле и ионов в растворе от одного участка к другому.

Электрохимическая коррозия агрегатов топливных систем двигателей наблюдается при обводнении топлива и окислении его до органических кислот и оснований, способствующих увеличению электропроводности топлива.

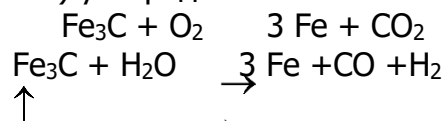
Электрохимическому разрушению подвержены стали, бронзы, латуни, дюралюминий и другие сплавы. Этому виду коррозии способствует нарушение защитного оксидного слоя металла и действие ее наблюдается в виде отдельных пятен ржавчины, местных потемнений и неглубоких очагов.

Биохимическая коррозия связана с жизнедеятельностью в реактивных топливах различных микроорганизмов (свыше 100 видов бактерий, грибов, спор и других). Питательной средой для них служат углеводороды. Способствует развитию микроорганизмов наличие воды и умеренных положительных температур в пределах +15 ... +35 С.

Органические и другие кислоты, выделяемые микроорганизмами в процессе жизнедеятельности, вызывают коррозию металлических стенок топливных баков, разрушение герметика, способствуют забивке топливных фильтров и форсунок продуктами коррозии. Для борьбы с развитием микроорганизмов в топливо добавляется микробицидная присадка, являющаяся одновременно и противоводокристаллизационной жидкостью (ПВКЖ) – жидкость «И-М». За рубежом в качестве бактерицидной применяется присадка, изготовленная на основе бора.

Газовая коррозия представляет собой химическую коррозию, протекающую в газовой среде при высоких температурах. Газовой коррозии подвергаются жаровые трубы камер сгорания, сопловые и рабочие лопатки газовых турбин, детали реактивных сопел.

В результате газовой коррозии могут проходить процессы обезуглероживания (и, как следствие, разупрочнения) углеродистых сталей по механизму:

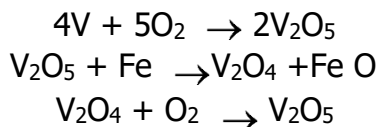


Химические процессы при протекании газовой коррозии связаны с присутствием в продуктах сгорания соединений серы SO_2 , SO_3 и натрия Na_2O , а также соединений ванадия и молибдена.

При температурах выше 800 С. никель, составляющий основу жаропрочных сплавов, при взаимодействии с SO_2 образует сернистый никель (NiS), который отлагается по границам зерен и способствует развитию межкристаллитной коррозии. При более высокой температуре может образовываться сульфид никеля (Ni_2S_2), дающий с никелем легкоплавкую эвтектику ($t_{\text{пл.}} = 625 \text{ С}$), что приводит к снижению прочностных характеристик. Присутствие молибдена способствует поглощению сплавом кислорода.

Оксид MoO_3 легколетуч ($t_{\text{пл.}} = 750 \text{ С}$); его испарение разрушает защитную окисную пленку и открывает доступ к металлу новых порций горячих газов.

Присутствие в топливах следов ванадия и молибдена также способствует развитию газовой коррозии. Попадая на поверхность сталей пятиокись ванадия (V_2O_5) образует легкоплавкие соединения, приводящие к разрушению стальных жаропрочных конструкций:

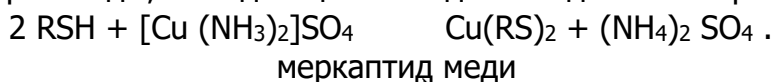


Коррозионные свойства авиатоплив оценивают по испытанию на медной пластинке, количеству серы в топливе, содержанию меркаптановой серы, кислотности.

При **испытании на медной пластинке** стандартную пластинку из чистой электролитической меди выдерживают в топливе в течение 3-х часов при $t=50$ С. Появление на пластинке черных, темно-коричневых или серо-стальных налетов и пятен указывает на содержание в топливе активных сернистых соединений. При отсутствии изменения цвета пластинки топливо считается выдержавшим испытание.

Количество серы в топливе определяется путем сжигания 1,5...5,0 мл топлива и измерении объема образующегося сернистого ангидрида.

Содержание меркаптановой серы определяется путем титрования испытуемого образца топлива аммиачным раствором $CuSO_4$. При этом меркаптаны превращаются в меркаптиды, выпадающие в осадок и отделяемые фильтрованием



При **испытании на кислотность** определенный объем топлива обрабатывают кипящим этиловым спиртом, который растворяет органические кислоты. Полученную вытяжку оттитровывают раствором KOH. Кислотность выражают в количестве мг KOH, требующихся для нейтрализации 100 мл топлива.

3.5. Низкотемпературные свойства

Понижение температуры топлива вызывает непрерывное повышение его вязкости. При этом наибольшей вязкостью обладают ароматические углеводороды, наименьшей - парафиново-циклановые. Прокачка высоковязких топлив по топливной системе самолета сопровождается высокими гидравлическими потерями, уменьшением производительности топливных насосов, снижением качества распыла и испарения топлива при подаче в камеру сгорания.

Кроме того, при снижении температуры топлива происходит образование кристаллов углеводородов или льда. При этом фильтрующая способность топливных фильтров ухудшается вплоть до забивки фильтров и прекращения подачи топлива к форсункам.

О низкотемпературных свойствах топлива судят по температуре помутнения, кристаллизации.

Температура помутнения – это температура, при которой топливо начинает мутнеть вследствие выделения микроскопических кристаллов льда или углеводов.

Температурой кристаллизации называют максимальную температуру, при которой в топливе появляются первые кристаллы, видимые невооруженным глазом.

Температура кристаллизации отечественных топлив ТС-1, РТ составляет -60°C .

3.6. Растворимость воды в топливе

Растворимость воды или гигроскопичность в топливе зависит от химического состава, молекулярного веса углеводов, влажности, температуры и атмосферного давления. Различают обратимую и необратимую гигроскопичность топлив.

Под **необратимой гигроскопичностью** понимается поглощение воды топливом, связанное с образованием устойчивых химических соединений воды и компонентов топлива. В этом случае вода не выделяется в свободном состоянии даже при резких колебаниях температуры и давления.

Обратимая гигроскопичность определяется способностью топлива поглощать воду и выделять ее в виде отдельной фазы при колебаниях температуры и давления.

Механизм поглощения воды при обратимой гигроскопичности связан со способностью воды заполнять межмолекулярное пространство без химического взаимодействия. Колебания температуры будут менять межмолекулярный объем и поглощенная вода будет либо вытесняться из него, либо заполнять.

Количество воды, растворенное в топливе, согласно закону Генри определяется уравнением

$$C = C_{\max} P/P_{\text{нас}},$$

где C – концентрация воды в топливе;

C_{\max} – максимально возможная концентрация воды в топливе при данной температуре;

P – парциальное давление паров воды в воздухе (абсолютная влажность);

$P_{\text{нас}}$ – давление насыщенного пара воды при температуре раствора (максимальная влажность).

Отношение $P/P_{\text{нас}}$ называется относительной влажностью. При повышении влажности воздуха количество растворенной воды возрастает и достигает максимума при 100% влажности.

При понижении температуры относительная влажность воздуха уменьшается, гигроскопичность топлив также снижается. При этом молекулы воды, выделяющиеся из межмолекулярного пространства частично испаряются в надтопливное пространство, а основная часть выделяется в виде эмульсии типа "вода в топливе". Под влиянием температуры, механического

перемешивания микрокапли эмульсионной воды коагулируют, т.е. образуют более крупные капли воды в топливе. На определенной стадии укрупнения капля воды начинается ее отстаивание. Такой процесс образования эмульсионной воды происходит в баках летательных аппаратов при наборе высоты, и вызывается он снижением влажности воздуха, давления и температуры в надтопливном пространстве.

Понижение температуры топлива ниже 0°C может привести к превращению эмульсии воды в суспензию льда. При высокой чистоте заправляемого топлива эмульсионная вода может находиться в переохлажденном (до -40°C) состоянии. Образование льда в этом случае происходит при встрече каплей переохлажденной воды с сеткой топливного фильтра, что приводит к забивке фильтра, прекращению подачи топлива и выключению двигателя.

Для предупреждения образования кристаллов льда в топливе применяют конструктивные и физико-химические методы.

Конструктивные методы предусматривают подогрев топливных фильтров при их забивке льдом. Подогреватели топливных фильтров установлены на современных отечественных и зарубежных самолетах.

Физико-химические методы предусматривают:

- впрыск жидкостей, растворяющих кристаллы льда на фильтре;
- вымораживание топлива с последующей фильтрацией и удалением кристаллов льда при подготовке топлива к заправке;
- введение в топливо специальных присадок, растворимых как в топливе, так и в воде и образующих в растворе с водой антифриз.

В качестве таких присадок на отечественных самолетах предыдущих поколений (Ту-154, Ил-62, Ил-18, Ту-134 и т.п.) получила применение противоводокристаллизационная жидкость (ПВКЖ) марки "И-М". Она состоит из этилцеллозольва (50% масс) и метанола (50% масс) и добавляется в топливо при заправке в количестве 0,1-0,15% в тщательно перемешанном виде. Конкретное количество добавляемой ПВКЖ "И-М" зависит от типа самолета, продолжительности рейса, температуры воздуха в аэропорту вылета и определяется нормативной документацией по заправке ВС.

3.7. Загрязнение авиационных топлив

Основными источниками загрязнений топлив являются материалы, вещества и среды, контактирующие с топливом. Такими загрязнениями могут быть: минеральные примеси, попадающие в топливо из перерабатываемой нефти; продукты коррозии и износа технологического, транспортного и складского оборудования при производстве, транспортировке и хранении топлив; загрязнения, попадающие в топливо из воздуха через "дыхательную" систему резервуаров и дренажную систему топливных баков; продукты окисления нестабильных компонентов топлив; продукты коррозии деталей топливной аппаратуры.

Результаты спектрального анализа твердых частиц в топливе показывает, что в их состав входят такие элементы, как Si, Fe, Cu, Sn, Pb, Mg, Al, Zn, Cr, Ni, Ti, Mn, P и др. Форма и размер частиц загрязнений различны и находятся в пределах от 1 до 40 мкм. Большие по размеру загрязнения удаляются при многоступенчатой фильтрации топлива при его подготовке к заправке ВС.

Микрозагрязнения в условиях эксплуатации могут приводить к заклиниванию прецизионных золотниковых пар топливорегулирующей аппаратуры, повышать абразивный износ деталей топливных агрегатов, интенсифицировать коррозию топливного оборудования и процессы окисления углеводородов.

Поэтому к чистоте реактивных топлив предъявляются высокие требования – содержание механических примесей в соответствии с Российскими нормативами должно быть не более 2г/т (0,002% масс).

Такая чистота заправляемого топлива достигается длительным отстаиванием топлива в резервуаре (не менее 4 часов на 1 метр высоты налива топлива), применением трехступенчатой системы фильтрации топлива при подготовке его к заправке через систему фильтров с последовательно уменьшающейся тонкостью фильтрации: 20мк, 10мк, 3мк.

Кроме того, используется закрытая заправка топливной системы, установка воздушных фильтров в дренажную систему, периодическая (1 раз в год) зачистка резервуаров хранения топлива от накопившихся загрязнений.

3.8. Нагарообразующие свойства топлив

При сгорании углеводородов топлив образуются твердые тонкодисперсные частицы, близкие по составу к углероду. Часть этих частиц уносится с продуктами сгорания в виде дыма, другая часть оседает в виде нагара на стенках жаровых труб камер сгорания и, особенно, в зоне ввода в камеру сгорания первичного воздуха. Толщина нагара в этой зоне может достигать 3-4 см.

Состав и цвет нагара зависит от химического состава топлива, режима работы двигателя и температуры деталей.

Отложение нагара на стенках жаровых труб приводит к снижению теплопроводности, возникновению температурного градиента, приводящего к образованию местных температурных напряжений, короблению и растрескиванию стенок жаровых труб. Кусочки нагара, отрываясь от стенок труб, вызывают повреждения лопаток турбин. Нагары на топливных форсунках ухудшают распыл топлива, искажают фронт и структуру пламени и могут быть причиной местных прогаров жаровых труб.

Для оценки склонности топлива к образованию нагара используется стандартная керосиновая лампа. Длина пламени в момент образования копоти принимается за **точку дымления** (h). Чем выше точка дымления (высота не коптящего пламени), тем меньше склонность топлива к нагарообразованию.

Зависимость точки от группового состава углеводородов выражается уравнением

$$h = 0.48П + 0.32Ц + 0.20А,$$

где h – точка дымления, мм;

$П$, $Ц$, $А$ – содержание парафиновых, циклановых и ароматических углеводородов в массовых процентах.

То есть наибольшее влияние на образование нагара оказывают ароматические углеводороды.

Интенсивность свечения пламени при горении реактивных топлив определяется люминометрическим числом (ЛЧ).

В соответствии с зарубежными спецификациями нагарообразующие свойства топлив широкого фракционного состава оценивают **индексом дымления и летучести**, которые определяются по формуле

$$\text{ИДЛ} = h + 0.42X,$$

где h – точка дымления, мм;

X – количество фракций в % объема, выкипающих до 204.4°C.

Таким образом, ИДЛ связывает точку дымления и характеристику испаряемости топлива.

3.9. Электризация топлива

Чистое топливо - хороший диэлектрик и характеризуется низкой электропроводностью.

При течении топлива вследствие внутреннего трения в объеме жидкости накапливаются заряды статического электричества. Скорость накопления заряда возрастает при увеличении скорости течения топлива и поверхности трения. В связи с этим наибольший заряд накапливается в топливе после прохождения фильтра. Часть этого заряда уходит через поверхность заземленного фильтра в землю. Другая же, основная часть, вследствие малой электропроводности накапливается в баках ВС, создавая условия для воспламенения паров топлива от заряда статического электричества.

Для уменьшения электризации топлив уменьшают скорость фильтрации, устанавливают игольчатые нейтрализаторы статического электричества (ИНСЭТ) непосредственно после фильтров, заземляют заправочное оборудование, вводят антиэлектростатические присадки, увеличивающие электропроводность топлив.

Установка ИНСЭТ снимает до 90% заряда, накопленного при фильтрации. Антистатические присадки типа "Сигбол" увеличивают электропроводность топлива в 3-5 раз.

3.10. Топливо для газотурбинных двигателей гражданской авиации

Отечественная нефтеперерабатывающая промышленность вырабатывает для гражданской авиации две марки реактивного топлива - ТС-1 и РТ, которые являются взаимозаменяемыми.

ТС-1 - является прямогонной лигроино-керосиновой фракцией, полученной из сернистых нефтей, выкипающей в интервале температур от 150 до 250°C. Его плотность при 20°C не менее 775 кг/м³, кинематическая вязкость при 20°C не ниже 1,25 мм²/с. Обладает удовлетворительными противоизносными свойствами, хорошей прокачиваемостью в области отрицательных температур.

Понижение конца кипения ТС-1 по сравнению с РТ (280°C) связано с тем, что в его хвостовых фракциях концентрируется значительное количество высокоплавких парафиновых углеводородов и сернистых соединений.

Высокоплавкие парафиновые углеводороды повышают температуру начала кристаллизации. В зависимости от содержания парафиновых углеводородов вырабатывают: ТС-1 с температурой кристаллизации -60°C (для применения в районах крайнего севера); ТС-1 с температурой начала кристаллизации -55°C (для применения в остальных климатических районах государств содружества). В последние годы вырабатывают ТС-1 с температурой кристаллизации - 50°C (для применения в климатических районах, где наружная температура воздуха не ниже -45°C).

Сернистые соединения вызывают коррозию любых металлов и сплавов, поэтому в топливе ТС-1 они ограничиваются. Массовая доля серы не превышает 0,25%, а содержание меркаптановой серы допускается не более 0,005%.

РТ - унифицированное реактивное топливо предназначено для реактивных двигателей дозвуковой авиации. Выкипает данное топливо в температурном интервале 135...280°C, имеет кинематическую вязкость не менее 1,25 мм²/с, а температуру вспышки не менее 28°C.

РТ получают из нефтей различных месторождений по технологии прямой перегонки с применением процессов гидроочистки и добавлением присадок, улучшающих термическую стабильность и противоизносные свойства топлива. В процессе производства РТ прямогонные дистиллаты подвергают гидроочистке. При этом в топливе снижается содержание массовой доли серы до 0,1%, в том числе массовая доля меркаптановой серы понижается до 0,001%. Уменьшается количество непредельных углеводородов, смолистых веществ. Улучшается химическая и термическая стабильность топлива. В топливе уменьшено количество ароматических углеводородов до 18,5%, поэтому склонность РТ к нагарообразованию ниже, чем у ТС-1.

Для улучшения противоизносных свойств добавляют присадки: ионол в количестве 0,003-0,004% и нефтяные кислоты в количестве 0,002- 0,04%.

В связи с дефицитом данных присадок в последнее время налажено производство РТ с присадками хайтек-580 в количестве 0,0025% и агидол в количестве 0,0031%.

Последние десятилетия характеризуются быстрым сокращением запасов нефти в традиционных районах ее добычи. Новые месторождения находятся, как правило, в труднодоступных районах. Это затрудняет их освоение, приводит к существенному росту эксплуатационных расходов по добыче нефти, следовательно, к ее удорожанию.

В качестве альтернативы топливам, получаемым из нефти, рассматриваются возможности широкого использования газовых топлив, получаемых из природного и нефтяного газов, а также - биотоплив.

Газовые топлива, по сравнению с нефтяными, обладают лучшими экологическими показателями. Их потенциальные ресурсы во много раз превосходят ресурсы нефти. Топлива из легких углеводородных газов в настоящее время уже применяются на автомобильном транспорте. Ведутся интенсивные работы по переводу части железнодорожного и авиационного парка на газовые топлива.

Ведутся исследования с целью проверки возможности использования нефтяного газа в авиации. В частности, комплексный анализ, выполненный в ЦИАМ, ЦАГИ и ВНИПИгазпереработка в начале 80-х годов, показал, что для вертолетов оптимальным топливом, получаемым из нефтяного газа, является смесь пропана, бутана, пентана и гексана, получившая в дальнейшем условное название «авиационное сконденсированное топливо» (АСКТ).

АСКТ по многим эксплуатационным показателям превосходит применяемые на вертолетах традиционные авиатоплива. Оно экологически более чистое и менее коррозионно-активное: в нем отсутствуют сернистые соединения, ароматические углеводороды, смолы, асфальтены и другие вредные вещества, присутствующие в авиационных топливах (ТС-1, РТ и др.). АСКТ обладает лучшими пусковыми свойствами по сравнению с массовым авиатопливом ТС-1.

АСКТ по физико-химическим и эксплуатационным свойствам существенно отличается от топлив, получаемых из нефти. Поэтому перевод транспортного средства на АСКТ требует определенной доработки двигателя и летательного аппарата.

По инициативе ЦАГИ и ЦИАМ в 1982 г. было принято решение о технической реализации предложения по использованию топлива, получаемого из нефтяного газа, на вертолете Ми-8Т. В ЛНПО им. В.Я. Климова была проведена доработка двигателя, а в МВЗ им. М.Л. Миля - вертолета. Топливная система была доработана из расчета подачи в камеру сгорания АСКТ в жидком состоянии.

Предварительные стендовые испытания двигателя на сжиженном газе были проведены в ЛНПО им. В.Я. Климова в конце 1985 г. Двигатель испытывался на технологическом бутане, пропан-бутановых смесях, пропане и топливе ТС-1. Было установлено, что основные параметры двигателя при работе на сжиженных газах и топливе ТС-1 практически не отличались от параметров серийного двигателя.

Модернизированный двигатель был установлен на специально подготовленный вертолет Ми-8Т. Первый полет экспериментального вертолета состоялся в конце 1987 г., а в начале 1988 г. были успешно завершены летные испытания.

Исследования, проведенные ЦАГИ, ЦИАМ, ГосНИИГА, НИПИГазпереработка, ОКБ С.В. Ильюшина и А.С. Яковлева, показали возможность, а, главное, эффективность перевода на газовое топливо не только вертолетов, но и самолетов. Причем, такую разновидность газового топлива, как АСКТ-Б (обеспропаненное АСКТ), можно заливать непосредственно в плоские крыльевые топливные баки самолетов местных авиалиний (Ил-114, Як-

40) и т.п. до температуры окружающей среды от +5°C и ниже (такие температуры в некоторых районах Сибири и Севера бывают до 10 месяцев в году). Масса дополнительных агрегатов газокеросиновой топливной системы, например, для самолета Ил-114 не превысит ~20 кг.

На разных стадиях разработки и внедрения находятся следующие специально предназначенные для транспорта сорта топлив:

- сжиженный природный газ (СПГ) для поршневых двигателей по ТУ-51-03-85;
- криогенное метановое топливо (КМТ);
- авиационное сконденсированное топливо (АСКТ) по ТУ 39-1547-91.

Сжиженный природный газ (СПГ). Предназначается для использования в двигателях автомобилей, тепловозов, речных судов в соответствии с ТУ 51- 03-85 и в авиации (топливо КМТ – криогенное метановое).

Топливо по ТУ 51-03-85 изготавливается из природного или глубоко отбензиненного нефтяного газа. Основной компонент в этом топливе метан. По физико-химическим свойствам топливо должно соответствовать требованиям и нормам, приведенным в табл. 3.2. Это топливо без цвета и запаха относится к криогенным жидкостям с температурой -168...-150°C при атмосферном давлении; плотность 460-480 кг/м³.

Таблица 3.2

Характеристики топлива из очищенного природного газа (ТУ 51-03-85)

Показатель	Норма
Состав, % (об):	
СН ₄	92 ±6
С ₂ Н ₆	4± 3
С ₃ Н ₈ +В	2,5 ±2
Н ₂	1,5±1,5
Содержание сероводорода и меркаптановой серы, % (мас.), не более	0,005
Теплота сгорания низшая при температуре 20°C, кДж/м ³ , не менее	39100

Авиационное сконденсированное топливо (АСКТ). На топливо имеются технические условия ТУ 39-1547-91. Оно представляет собой смесь легких парафиновых углеводородов (пропан, бутан, пентан, гексан с небольшими примесями этана и гептана). АСКТ бесцветная, прозрачная жидкость, кипящая при отрицательных температурах, имеет специфический запах. Основным сырьем для его производства является широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ), получаемая на НПЗ из нефтяного газа. Топливо предназначено для использования в летательных аппаратах с газотурбинными двигателями. По физико-химическим свойствам АСКТ должно соответствовать требованиям и нормам, приведенным в табл. 3.3.

Физико-химические свойства АСКТ, отличающие его от керосина, обуславливают принятие специфических мер по обеспечению техники безопасности, пожарной защиты и охраны окружающей среды при его использовании. Однако, учитывая, что свойства АСКТ близки к свойствам углеводородных газов, при его использовании достаточно соблюдать требования, изложенные в «Правилах техники безопасности в газовом хозяйстве», утвержденных Ростехнадзором РФ.

Таблица 3.3

Техническая характеристика АСКТ по ТУ 39-1547-91

Показатель	Норма
Массовое содержание пропана, %, не более	7,2
Давление насыщенных паров при 450С, МПа (кг/см ²), не более	0,50 (5,0)
Плотность в жидком состоянии при 20°С, кг/м ³ , не менее	585
Теплота сгорания низшая, кДж/кг (ккал/кг), не менее	45200(10800)
Массовая доля сернистых соединений в пересчете на серу, % (мас.), не более	0,002
Содержание свободной воды и щелочи	Отсутствие
Содержание механических примесей	Отсутствие
Внешний вид	Прозрачный, бесцветный

В качестве авиационных криогенных топлив рассматриваются жидкий водород (КВТ), жидкий метан (КМТ) и жидкие углеводороды C₃-C₅ (АСКТ-К). Каждое из этих топлив обладает своими достоинствами и недостатками, которые в значительной мере определяют область наиболее эффективного и рационального их применения как на сверхзвуковых ЛА со скоростями полета вплоть до гиперзвуковых, так и на дозвуковых воздушных судах (ВС).

На сегодня уже имеется определенный научный технический задел по созданию ЛА на криогенных топливах (на водороде и метане). Наиболее успешными оказались практические действия в этом направлении АНТК им. А.Н. Туполева и Самарского НТК им. Н.Д. Кузнецова.

Первый в мире полет самолета, использующего в качестве топлива жидкий водород, - самолет Ту-155 с двигателем НК-88 В, оборудованный бортовой криогенной топливной системой, был осуществлен в апреле 1988 г. Через год на этом самолете был совершен полет на сжиженном природном газе (практически на метане). Несколько полетов этого самолета в европейские страны на авиационные выставки подтвердили реальность технических решений, обеспечивающих перспективу широкого развития криогенной авиации. Сравнительная характеристика криогенных топлив представлена в табл. 3.4.

Анализ показывает, что на современном уровне развития авиационной техники, а также наземной инфраструктуры технологически и экономически перспективным направлением следует считать использование криогенных топлив (АСКТ-К), получаемых на базе легких парафиновых углеводородов с низкой температурой кристаллизации (от пропана до гексана).

АСКТ-К представляет собой легкокипящую пожаровзрывоопасную жидкость. С воздухом пары АСКТ-К образуют пожароопасные смеси в пределах 1,5...9,5%(об.). Это топливо по сравнению с авиакеросином менее склонно к самовоспламенению. Температура самовоспламенения АСКТ-К в зависимости от состава может находиться в пределах 350...470°C (у авиакеросинов $t_{\text{см}} = 210...220^\circ\text{C}$).

Таблица 3.4

Примерная сравнительная технико-экономическая характеристика криогенных топлив

Топливо	Нормальное	Криогенное		
	АСКТ (C ₃ -C ₆)	АСКТ-К (C ₃ – C ₅)	КМТ (CH ₄)	КВТ (H ₂)
Рабочая температура, °С	+45...-90 (при p= 0,5 МПа)	-40...-180	-160-180	-253- 259
Диапазон жидкого состояния, ΔT, °С	135	140	20	6
Относительная цена тепловой единицы	0,5...0,6	0,6...0,8	1,2...1,6	10...15
Относительные затраты на сооружение аэропорта	1,3	2	6	>100

По сравнению с авиакеросинами компоненты АСКТ-К обладают более высокой термостабильностью. Они менее агрессивны по сравнению с авиакеросинами по отношению к конструкционным, резинотехническим и уплотнительным материалам.

Накопленный опыт эксплуатации ЛА на АСКТ-К позволит быстрее и с меньшими расходами перейти к эксплуатации ЛА на КМТ и затем на КВТ.

3.11. Биотопливо

В настоящее время страны Евросоюза проводят интенсивную работу по использованию возобновляемых источников энергии и, в частности, биотоплива для автомобильного и авиационного транспорта.

Под биотопливом понимается твердое, жидкое или газообразное топливо, получаемое из биомассы растений химическим или биологическим способом.

Основу твердого топлива составляют дрова, брикеты, топливные гранулы, щепа, солома, лузга.

К жидкому биотопливу относят биоэтанол, биометанол, биобутанол, диметиловый эфир, биодизель.

Газообразными биотопливами являются биогаз, биоводород, метан.

Различают три поколения биотоплив (рис. 3.5).

Биотопливо первого поколения изготавливают из сахара, крахмала, растительного масла и животного жира, используя традиционные технологии. Основными источниками сырья являются семена или зерна. Например, семена подсолнуха прессуют для получения растительного масла, которое затем может быть использовано в биодизеле. Из пшеницы получают крахмал, после его сбраживания – биоэтанол.

Однако такие источники сырья занимают место в пищевой цепочке людей и животных.

Растительные масла – это жидкие жиры растительного происхождения. Другое название жиров – триглицериды. Триглицерид представляет собой остов глицерина, к которому прикреплены радикалы жирных кислот.

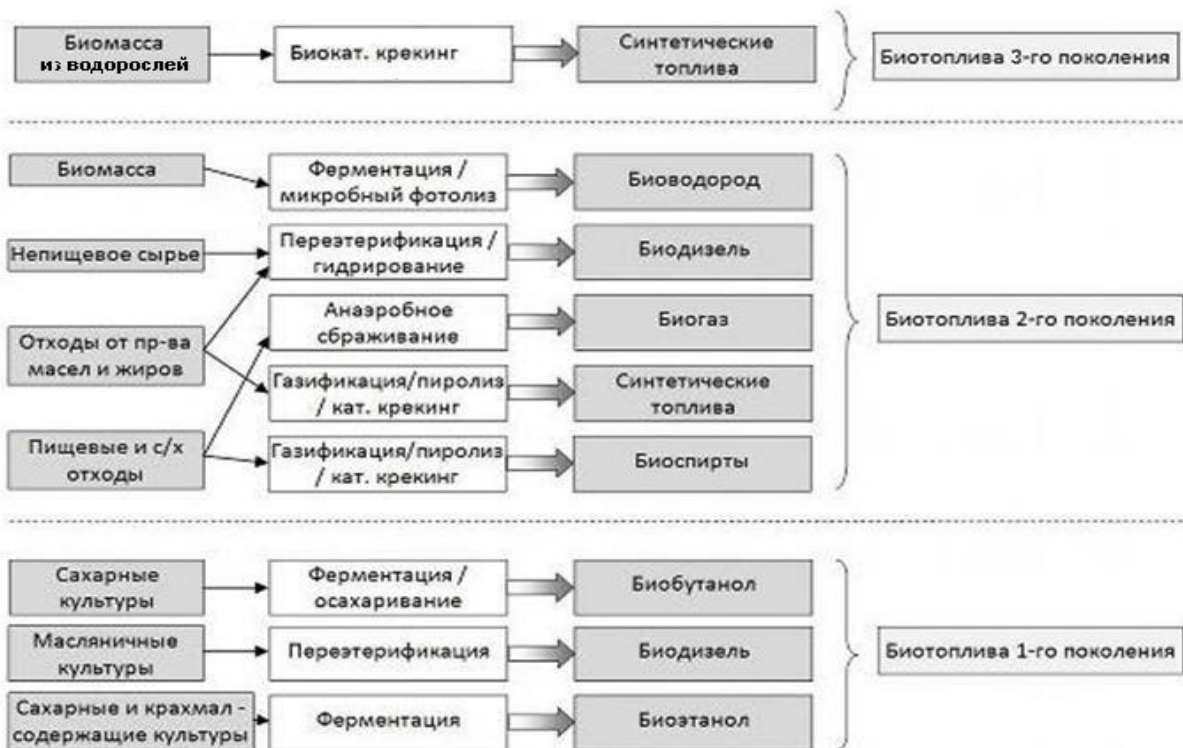
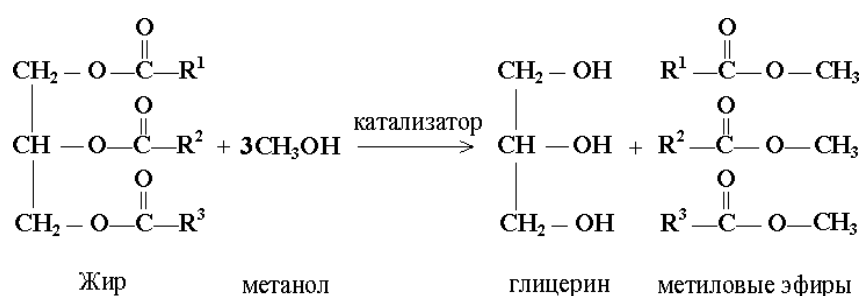


Рис. 3.5. Три поколения биотоплив

Растительные масла имеют слишком большую вязкость, которая препятствует их прямому использованию в качестве дизельного топлива. Вязкость и плотность им придает остов глицерина в составе молекул триглицеридов. Если в молекуле триглицерида остов глицерина заместить на более легкий остов этанола или метанола, то будет получен менее вязкий и менее плотный эфир, соответственно этиловый или метиловый. Полученные продукты вполне пригодны для прямого использования в качестве топлива для дизельных автомобилей (биодизеля).

Реакцию обмена глицерина в составе жиров на остовы метила или этила называют переэтерификацией (или трансэтерификацией). В случае реакции с метиловым спиртом уравнение химической реакции будет выглядеть следующим образом



То есть сложный эфир глицерина (триглицерид) + метанол = сложные эфиры метанола + глицерин.

Реакция переэтерификации идет очень медленно и протекает лишь в присутствии катализатора. В промышленных масштабах в качестве катализатора используются гидроксиды щелочных металлов (NaOH, KOH). Образование эфира как при реакции этерификации, так и при реакции переэтерификации никогда не идет до конца. Глубина переэтерификации при благоприятных условиях достигает 95-96%. Реакция переэтерификации с применением спиртов называется алкоголизом. С увеличением молекулярной массы спирта алкоголиз замедляется. Величина в 95-96% выхода эфира относится к случаю использования метилового спирта. При использовании этилового спирта глубина алкоголиза соответствует примерно 35%. В этой связи, не смотря на то, что этиловый спирт гораздо более экологичен, чем метиловый, именно метиловый спирт находит большее применение. И зарубежные стандарты на биодизель распространяются именно на метиловые эфиры.

Таким образом, в настоящее время для производства биодизеля используются следующие компоненты: растительные масла; метанол; щелочи (NaOH, KOH).

Биотопливо второго поколения способно увеличить количество выпускаемого экологически устойчивого биотоплива, используя биомассу, состоящую из остаточных непищевых частей растений, таких как стебли, листья, шелуха, оставляемых после извлечения пищевой части. Также годятся

непищевые растения (просо, ятрофа) и производственный мусор: древесная стружка, кожура и мякоть от прессовки фруктов и т.п.

Биотопливо третьего поколения изготавливается из водорослей. Водоросли - дешевое и высокопродуктивное сырье для получения биотоплива. Тем не менее, водорослевое топливо имеет и свои трудности при производстве: необходима большая площадь для выращивания водорослей.

Переработка биомассы водорослей путем биокаталитического крекинга позволяет получать синтетические нефтепродукты очень высокого качества. В результате быстрого биокаткрекинга биомассы водорослей без доступа кислорода образуются твердые, жидкие и газообразные горючие продукты (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Выход топлива при биокаталитическом крекинге

Жидкая фаза, % масс.	Газообразная фаза, % масс.	Кокс, % масс.
80-85	12-17	3-5

Углеводороды жидкой фазы представляют собой набор углеводородов, содержащихся в бензиновой, керосиновой, дизельной фракциях нефти (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Полученные продукты жидкой фазы синтеза нефти

Бензиновая фракция, % масс.(от жидкой фазы)	Керосиновая фракция, % масс. (от жидкой фазы)	Дизельная фракция, % масс. (от жидкой фазы)
7-10	10-15	75-83

По своим свойствам углеводороды жидкой фазы полностью соответствуют углеводородам аналогичных фракций нефти.

Преимущества и недостатки биотоплива

Преимущества:

1. Использование возобновляемых сырьевых источников.
2. Эфиры растительных масел подвергаются практически полному биологическому распаду: в почве или в воде микроорганизмы за 28 дней перерабатывают 99% эфиров растительных масел.
3. Низкая стоимость производства вследствие относительно простой технологии и низких энергозатрат.
4. Побочный продукт производства эфиров растительных масел – глицерин, востребован во многих отраслях народного хозяйства.

Недостатки:

1. Высокая адгезия (прилипаемость к стенкам трубопроводов и резервуаров), высокая гигроскопичность.

2. При использовании биодизеля мощность дизельного двигателя снижается на 5-8%.

3. Повышенная вязкость и высокая температура застывания эфиров растительных масел. Ухудшение запуска двигателей при температуре ниже - 15⁰С.

4. Низкая термостабильность и высокая склонность эфиров растительных масел к разложению: биодизель не рекомендуется хранить более трех месяцев. Катализатором процесса разложения эфиров растительных масел является наличие в топливе кислорода, воды, примесей, повышенная температура. Продуктами разложения являются органические кислоты.

5. Метилловые эфиры жирных кислот – химически активные (агрессивные) жидкости. Они вызывают высыхание, затвердение и разрушение резинотехнических изделий, коррозию агрегатов и трубопроводов топливной системы.

6. Повышенное количество углеродистых отложений метилового эфира на поверхности камеры сгорания и закоксовывание сопловых отверстий распылителей форсунок через 100-200 часов работы.

Попадание следов биодизеля в авиационный керосин приводит к снижению его термостабильности и в ряде случаев к отказу системы регулирования.

3.12. Эксплуатационные свойства присадок к топливам

Присадки – вещества, добавляемые в незначительных количествах к топливам для улучшения их эксплуатационных свойств.

Присадки к топливам по своему назначению подразделяются на антиоксиданты, противоводокристаллизационные, антистатические, ингибиторы коррозии, улучшающие противоизносные свойства топлив, деактиваторы металлов, биоцидные и др. Известны также многофункциональные присадки, обладающие одновременно, например, противокоррозионными, антиокислительными и противоизносными свойствами. Сочетания положительных свойств обычно достигают разработкой композиции присадок-синергистов, воздействующих одно на другое в направлении усиления эффективности каждой отдельной присадки.

Антиокислительные присадки при хранении и транспортировании топлив снижают интенсивность окислительных процессов. В результате уменьшается образование уплотненных продуктов окислительной полимеризации и интенсивность воздействия продуктов окисления на полисульфидные герметики и уплотнительные материалы на основе нитрильных резин.

Ингибитор окисления **Агидол** добавляется в гидроочищенные топлива, поскольку при гидрогенизационной обработке из таких топлив удаляются природные ингибиторы окисления - гетероатомные соединения. Механизм действия антиокислителей заключается во взаимодействии их с активными

радикалами, дающими начало окислительным цепным процессам и с гидропероксидами. Присутствие в топливах антиокислителя снижает образование смол и кислот при температурах до 150°C. Расход многих антиокислительных присадок резко возрастает в присутствии катализаторов окисления - главным образом меди и ее сплавов.

Деактиваторы металлов. Катализ окисления углеводородных топлив ионами металлов заключается в генерировании радикалов, обуславливающих развитие окислительных цепей и требующих дополнительного расхода деактиватора на вывод из сферы реакции вновь образующихся пероксидных радикалов. Восстановление металла протекает только с участием антиокислителей, которые в некоторые топлива вводят специально; в прямогонных топливах ими являются фенолы и серосодержащие соединения, присутствующие в них. К деактиваторам металлов относятся салицилиден, аминафенолы и др.

Противоизносные присадки. Действие противоизносных присадок основано на формировании в условиях высоких контактных температур и нагрузок на трущихся поверхностях хемосорбционного слоя, обладающего хорошими фрикционными качествами.

Разработана и испытана отечественная присадка «К». По результатам испытаний она рекомендована к применению. За рубежом в качестве противоизносной присадки применяется ингибитор коррозии Сантален С (всего же таких присадок более десятка).

Противоводокристаллизационные (ПВК) присадки. В качестве таких присадок применяют этилцеллозольв (жидкость «И») и его смесь с метанолом (жидкость «И-М»). Действие присадок обусловлено повышением растворимости воды за счет образования водородной связи между молекулами присадки и воды. До тех пор, пока содержание воды в топливе не превышает ее растворимости в этом топливе при данной температуре, вода в присутствии присадки находится в молекулярном несвязанном состоянии. Избыточная, выделяющаяся из топлива при данных условиях вода в свободном состоянии ассоциируется присадкой. При этом ассоциат включает как минимум четыре молекулы воды. При высоком содержании свободной воды и недостаточной концентрации присадки часть воды может выделяться в виде капель вместе с присадкой в соотношении, соответствующем коэффициенту распределения между топливом и присадкой. В результате капли воды кристаллизуются при более низких отрицательных температурах, чем в отсутствие ПВК-присадки, что и в этом случае предотвращает образование кристаллов льда. В авиации ПВК-присадки «И-М» вводят в топливо при заправке самолета. Отравление противоводокристаллизационными присадками проявляется в виде головной боли, рвоты, слабости, опьянения, потери сознания.

Биоцидные присадки. Применяют за рубежом в районах с тропическим и субтропическим климатом для подавления жизнедеятельности микроорганизмов. Биоцидные присадки стерилизуют водную фазу в топливе, наличие

которой обуславливает развитие микроорганизмов. В качестве биоцидных присадок применяются присадки Biobor и Kathon EP. Биоцидным действием обладает также метилцеллозольв, представляющий собой компонент противоводокристаллизационной присадки.

4. АВИАЦИОННЫЕ МАСЛА. СМАЗКИ

4.1. Назначение, классификация смазочных материалов

Основное назначение смазки любого механизма – уменьшение износа трущихся деталей и снижение мощности, затрачиваемой на трение.

Кроме того, смазочные материалы выполняют такие важные функции, как:

- отвод тепла, вызванного внутренним (из-за трения) и внешним нагревом деталей машин;
- предохранение деталей от коррозии;
- вынос продуктов изнашивания из пространства между трущимися поверхностями.

В зависимости от **агрегатного состояния** смазочные материалы подразделяются на твердые, пластичные (консистентные) и жидкие.

К **твердым смазкам** относят графит, дисульфид молибдена MoS_2 , слюда, тальк и др. Эти смазки находят как самостоятельное применение, так и в качестве присадок к маслам и пластичным смазкам.

Консистентные или пластичные смазки в обычных условиях (при комнатной температуре и в отсутствие внешних механических воздействий) ведут себя как твердые вещества: сохраняют форму, удерживаются на вертикальных поверхностях, не вытекают из узлов трения.

В то же время под воздействием нагрузок, превышающих предел их прочности, смазки начинают течь, выполняя заданные смазочные функции. При снятии нагрузок, смазки вновь становятся пластичными.

Жидкие масла – наиболее распространенный класс смазочных материалов, используемых в самих разнообразных узлах трения.

В зависимости от **назначения** смазочные материалы подразделяются на:

- моторные масла, предназначенные для смазки поршневых двигателей;
- масла для смазки газотурбинных, турбовинтовых и турбореактивных двигателей;
- турбинные масла - для смазки и охлаждения подшипников турбо агрегатов (гидротурбин, турбонасосных агрегатов и т.п.);
- компрессорные масла – для смазки и уплотнения деталей поршневых компрессоров;
- трансмиссионные масла – для смазки зубчатых передач трансмиссий различного назначения;

- гидравлические масла, представляющие собой несжимаемые рабочие жидкости и служащие для передачи энергии в гидросистемах и смазки узлов трения;
- консервационные масла – для защиты от коррозии трущихся деталей при длительном хранении;
- уплотнительные масла и смазки – для герметизации узлов трения.

По роду **исходного сырья** смазочные материалы (масла) подразделяются на: минеральные (нефтяные); растительные; животные; синтетические.

4.2. Основные сведения о производстве и свойствах минеральных (нефтяных) и синтетических масел

Основным сырьём для производства минеральных масел служат мазуты - остатки от прямой перегонки нефти. 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;
- производство 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 двигателей, агрегатов и приборов.

4.2.1. 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. 4.1 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, который изнутри оборудован специальными горизонтальными перегородками (так называемыми тарелками) с отверстиями, а иногда особой конструкции колпачками, обеспечивающими многократный контакт жидкости и пара. Схема работы ректификационной тарельчатой колонны была приведена на рис. 2.1 в разделе 2.1.

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

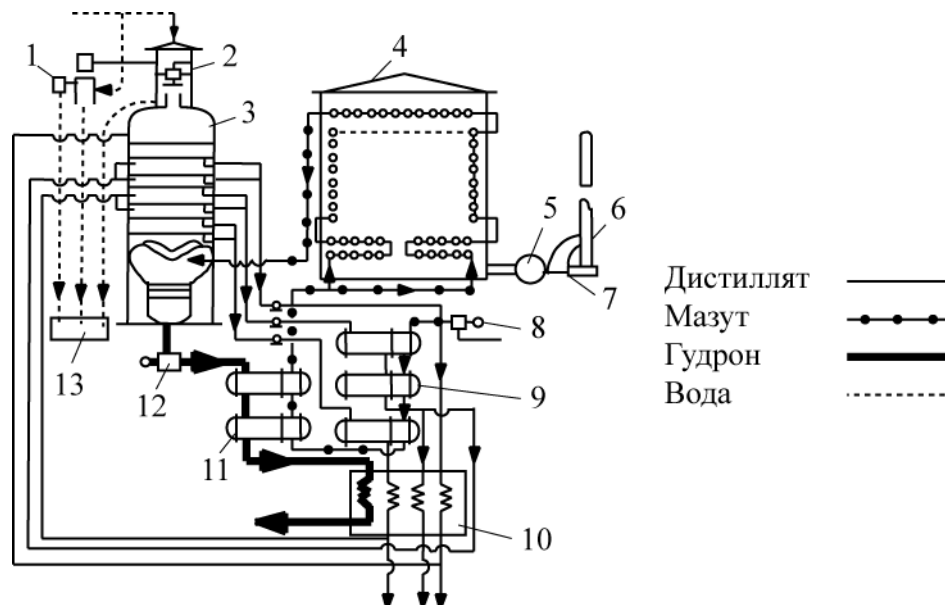


Рис. 4.1. Схема вакуумной установки:

- 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.

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 кислотнo-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. Кислотнo-щелочным способом многие годы проводилась очистка дистиллятных масел.

Наряду с кислотной очисткой при получении вязких остаточных БМ широко использовалась очистка с применением мелкоразмолотой 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 кислотнo-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.

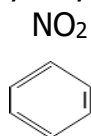
После селективной очистки, а иногда также и перед ней производят дополнительную контактную очистку масла. В качестве селективных растворителей долгие годы использовали фурфурол, фенол, нитробензол.

Фурфурол ($C_5H_4O_2$) – бесцветная жидкость с приятным запахом хлеба; ядовит; плотность при $25^{\circ}C$ – $1,155 \text{ г/см}^3$, температура кипения $161,7^{\circ}C$.

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

Фенол (C_6H_5OH) - бесцветное кристаллическое вещество, с температурой плавления $40,9^{\circ}C$ и температурой кипения $181,75^{\circ}C$. Плотность фенола при $41^{\circ}C$ – $1,05 \text{ г/см}^3$. 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 - $C_6H_5NO_2$ имеет следующую структурную формулу



Нитробензол принадлежит к числу эффективных селективных растворителей. Отличается высокой токсичностью. Температура кипения $211^{\circ}C$, температура плавления $5,76^{\circ}C$, плотность при $15^{\circ}C$ - $1,2 \text{ г/см}^3$.

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

Используется, в частности, смесь крезолов с 30-50% фенола и технического пропана (C_3H_8). Процесс проводят при повышенном давлении (до $2,0 \text{ МПа}$). 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.

N-метилпирролидон: температура плавления -24°C , температура кипения 202°C ; плотность при 20°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 гидрокрекинг-овые БМ.

Гидроочистка - каталитический метод очистки вакуумного газойля. Процесс гидроочистки применяют при облагораживании компонентов смазочных масел типа VHVI базовых масел с повышенным индексом вязкости (базовые масла второй группы) и парафинов с целью снижения содержания серы. Гидроочистка проводится при температуре $380\text{--}420^{\circ}\text{C}$ и давлении водорода $2,5\text{--}4,0 \text{ мПа}$ в присутствии алюмокобальт-молибденовых (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 гидрокрекинг-овые БМ, приближающиеся по своим свойствам к синтетическим. По этой причине некоторые производители называют такие масла **гидросинтетическими**.

4.2.2. Химический состав минеральных масел

В масляных дистиллятах содержатся парафиновые углеводороды нормального и изостроения ($\text{C}_n \text{H}_{2n+2}$), нафтеновые углеводороды, содержащие пяти- и шестичленные циклы с парафиновыми боковыми цепями разной длины, ароматические углеводороды (поли- и моно-циклические), а также

нафтеноароматические (с парафиновыми боковыми цепями), смолисто-асфальтеновые вещества, серу-, азот- и кислородсодержащие органические соединения. По сравнению с другими углеводородами парафиновые углеводороды имеют наименьшую вязкость, наиболее пологую вязкостно- температурную характеристику и наибольший индекс вязкости.

Нафтеновые и изопарафиновые углеводороды являются основой нефтяных масел и их содержание, в зависимости от характера нефти и температурных пределов выкипания нефтяных масляных фракций, составляет от 50% до 75% массы масла. От структурных особенностей нафтеновых углеводородов зависят их физико-химические свойства и ряд эксплуатационных свойств: так, чем больше колец в молекуле, тем выше их температура кипения; чем больше атомов углерода в боковых цепях, тем выше вязкость и индекс вязкости. При одном и том же числе атомов углерода в боковой цепи, с увеличением степени разветвленности цепи, температура застывания масла понижается.

От содержания СН-групп в боковых цепях и их положения зависит стабильность нафтеновых углеводородов против окисления молекулярным кислородом.

Ароматические и нафтеноароматические углеводороды присутствуют в легких масляных фракциях (350-400⁰С) в виде гомологов бензола и нафталина, в более тяжелых фракциях (400-450⁰С) содержатся моно-, би- и даже трициклические ароматические соединения.

Сероорганические соединения. В высококипящих фракциях нефти, идущих на производство масел, скапливается 60-70% сероорганических соединений от содержащихся в исходной нефти. Сероорганические соединения тяжелых фракций нефти принадлежат в основном к сульфидам, в том числе к производным тиофенам, сконденсированным с ароматическим или нафтеновым циклами.

В процессе производства значительная часть сероорганических соединений извлекается, однако некоторое количество их присутствует в маслах, изготовленных из малосернистых нефтей (0,16%).

В маслах из сернистых нефтей этих соединений содержится в 10 - 15 раз больше и составляет 0,5 - 1,5%, что при учёте молекулярной массы масел соответствует 10 – 15% сероорганических соединений.

Таким образом, в маслах, получаемых из сернистых нефтей, производные серы, наряду с парафинонафтеновыми и нафтеноароматическими соединениями, являются основными компонентами.

В зависимости от состава серосодержащие соединения больше или меньше влияют на противоизносные, противозадирные свойства и на стабильность при окислении, в связи с чем, присутствие этих соединений является положительным. Основное количество серосодержащих соединений содержится в присадках, входящих в промышленно производящиеся пакеты, широко используемые при производстве товарных масел. С другой стороны, с

точки зрения экологии, стремятся снизить содержание подобных соединений в составе базовых масел.

Азотсодержащие соединения входят в состав сукцинимидных присадок, широко используемых при производстве современных сортов товарных масел, постепенно вытесняющих серу и фосфорсодержащие присадки из рецептур последних. Внедрение подобных присадок связано с ужесточением экологических требований к товарным маслам. Старые рецептуры масел, содержащие серу и фосфорсодержащие противоизносные и противозадирные присадки при высоких температурах выделяли чрезвычайно токсичные серу и фосфорорганические соединения, пагубно влиявшие на окружающую среду.

Смолисто-асфальтеновые вещества содержатся в основном в высококипящих нефтяных масляных фракциях. Они относятся к классу полигетероциклических соединений, содержащих в цикле, кроме углерода и водорода, азот, серу, кислород, а иногда и различные металлы.

По принятой классификации смолисто-асфальтеновые вещества делят на смолы, асфальтены, карбены и асфальтогеновые кислоты и их ангидриды.

Нефтяные кислоты способны коррозионно воздействовать на металлы (свинец, олово, цинк, медь...), образуя соответствующие соли, которые, за исключением солей щелочных металлов, не растворимы в воде.

Металлоорганические соединения представлены в нефтяных фракциях производными ванадия, никеля, железа, меди, мышьяка и многих других металлов. Особенно много металлов содержится в высокосернистых, высокосмолистых нефтях, причём основная часть их сосредоточена в тяжелых фракциях и в гудроне. Все металлопроизводные, находясь в маслах даже в очень незначительных количествах, могут катализировать окисление компонентов масла в процессе эксплуатации, и поэтому являются нежелательными.

4.3. 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 авиационных масел:

- *полиэфирные масла на основе эфиров фосфорной кислоты* имеют недостаточные индексы вязкости (в пределах от 0 до -30);
- *фторуглеродные 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 и более высокотемпературные режимы работы в узлах трения. 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 производит полиальфаолефины, которые невозможно использовать при производстве современных авиамасел. 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.

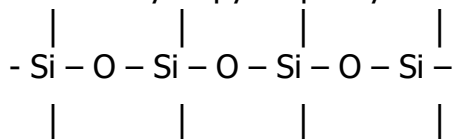
Полиэфиры. В качестве основы для производства синтетических авиационных масел нашел широкое применение эфир пентаэритрита (ПЭТ). Пентаэритрит получают взаимодействием формальдегида с ацетальдегидом в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Имеет формулу $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$.

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 250°C без изменения своих физико-химических характеристик.

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



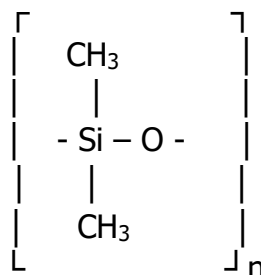
К атомам кремния в виде боковых цепей присоединены углеводородные и другие органические радикалы различного строения. В зависимости от длины молекулярных цепей, строения и состава боковых цепей, полисилоксаны имеют различные физические и химические свойства.

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.

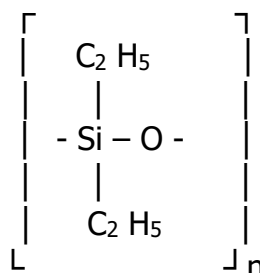
Хорошая термостойкость кремнийорганических соединений позволяет использовать их в качестве теплоносителей в условиях длительной эксплуатации при 350°C.

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.

4.4. Характеристика основных видов трения

При движении одного тела по поверхности другого возникает сила трения.

Трение подразделяется на статистическое (трение покоя) и трение движения.

В свою очередь трение движения подразделяется на:

- **трение скольжения** (первого рода), которое имеет место при контакте трущихся поверхностей по определенной площадке;

- **трение качения**, возникающее при соприкосновении трущихся поверхностей по линии или в одной точке (трение второго рода).

Трение скольжения подразделяется на 4 вида: сухое трение, граничное трение, полужидкостное и жидкостное.

Для оценки потерь мощности на трение используют коэффициент трения f , представляющий собой отношение силы трения F к нагрузке N :

$$f = \frac{F}{N}. \quad (4.1)$$

Сухое трение подчиняется закону Амонтона, который гласит, что коэффициент трения не зависит от площади контакта трущихся поверхностей. Это означает, что при одной и той же нагрузке N , силы трения и маленького и большого кубиков, скользящих по одной и той же поверхности одинаковы (рис. 4.2).

В результате коэффициент трения не зависит от нагрузки и, если $N_1 = N_2$, то $F_1 = F_2$.

Граничное трение возникает при наличии тончайшего слоя масла (пленки). При граничной смазке на выступающих участках поверхности материал пленки полностью вытесняется и возникает контакт металл-металл. Граничная смазка возникает при высоких нагрузках, а также в начальный период работы механизма и требует применения противоизносных и противозадирных присадок.



Рис. 4.2. Соотношение между нагрузкой и силой трения

Жидкостным называется такое трение, при котором трущиеся поверхности отделены друг от друга слоем смазочного материала. В этом случае трение происходит между слоями масла и определяется, в основном, его вязкостью. Жидкостный режим смазки является наиболее приемлемым для

трущихся деталей, так как он обеспечивает малые потери мощности на трение и малый износ деталей. Коэффициент жидкостного трения лежит в пределах 0,01...0,001.

Теория жидкостного трения разработана русским ученым профессором Н.П. Петровым, опубликовавшим в 1883 г. свой труд «Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости». Основываясь на законе Ньютона для трения в жидкости и результатах многочисленных опытов, он математически выразил закон жидкостного трения и предложил для практического использования следующую упрощенную формулу

$$F = \frac{\eta \cdot S \cdot V}{h}, \quad (4.2)$$

где F – сила жидкостного трения;

η

- динамическая (абсолютная) вязкость масла;

V - линейная скорость перемещения трущихся поверхностей; S – площадь соприкосновения трущихся тел;

h – толщина масляного слоя.

Динамическая вязкость η - это сила сопротивления движению двух слоев жидкости площадью 1 м^2 с градиентом скорости 1 м/с и находящихся на расстоянии 1 м друг от друга. Она измеряется в системе СИ в Паскаль-секундах; в системе измерений CGS единицей динамической вязкости является Пуаз, ($1\text{ Пз} = 0,1\text{ Па}\cdot\text{с}$). На практике используют сотые доли Пуаза - сантиПуаз. Например, вязкость воды при 20°C равна 1 сантиПуазу.

Кинематическая вязкость – это отношение динамической вязкости к плотности масла и выражается в системе СИ в $\text{м}^2/\text{с}$. В системе измерений CGS единицей кинематической вязкости является Стокс, $1\text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. На практике применяют сотые доли Стокса – сантиСтокс ($1\text{ сСт} = 1\text{ мм}^2/\text{с} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

При использовании кинематической вязкости формула Петрова примет вид

$$F = \nu \cdot \rho \cdot \frac{V}{h} \cdot S. \quad (4.3)$$

Из формулы (4.3) следует:

- при жидкостном трении сила трения и, соответственно, потери мощности тем больше, чем больше вязкость масла, скорость вращения вала V и площадь соприкосновения пар трения;

- надежность жидкостной смазки (наличие гарантированного слоя толщиной h) возрастает с увеличением скорости скольжения, вязкости масла и уменьшением нагрузки на подшипник;

- чем выше скорость скольжения, тем менее вязкое масло должно применяться в узлах трения и наоборот;

- чем больше зазоры между деталями, тем выше должна быть вязкость масла;

- чем выше нагрузка на трущиеся детали, тем более вязкое масло следует применять для смазки узлов.

4.5. Минеральные масла для авиационных двигателей

4.5.1. Масла для авиационных поршневых двигателей

В поршневых двигателях масла работают в тяжелых условиях, создаваемых высокими внешними температурами в цилиндропоршневой группе и высокими удельными нагрузками в кривошипно-шатунном механизме. Для обеспечения требуемых условий смазывания двигателя в условиях высоких температур и удельных нагрузок применяют высоковязкие масла, подвергнутые специальной очистке. Такие масла должны иметь высокую смазочную способность, не быть агрессивными к металлам, сплавам и др. конструкционным материалам и обладать достаточной стабильностью к окислению при высоких температурах и в условиях хранения.

Наибольшее применение для смазки поршневых двигателей самолётов нашло масло МС-20 кинематической вязкостью $V_{100} = 20,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 100°C , индексом вязкости не менее 80, температурой застывания не выше -18°C .

Масла МС-20, МС-20п, МС-20сп (класс по API – SB) обладают:

- высокой термической и термоокислительной стабильностью, что позволяет их использовать для охлаждения поршней, повышая предельный нагрев масла в картере, увеличивая срок замены;
- достаточными противоизносными свойствами, которые обеспечены нужной вязкостью, прочностью масляной пленки;
- малой эмульгируемостью с водой;
- хорошей способностью отделять воду и нерастворимые загрязнения при сепарации;
- малой вспениваемостью при высокой и низкой температурах;
- малой летучестью, низким расходом на угар (экологичность).

Еще одной маркой минерального масла для поршневых авиадвигателей является масло для турбовинтовых двигателей МН-7,5у. Это унифицированное масло на нефтяной основе с комплексом присадок. Область применения - разработано взамен маслосмесей, масел МН-7,5 и ВНИИНП-7. Можно применять в турбовинтовых двигателях всех типов при температуре масла на выходе из двигателя до 150°C . Зарубежный аналог AeroShell Turbine Oil 750, TurboNicoil 35M.

4.5.2. Масла для турбореактивных двигателей

В отличие от поршневого двигателя масло в ТРД изолировано от камеры сгорания; кроме того, в наиболее ответственных узлах трения реализуется трение качения. Ротор турбокомпрессора в ТРД хорошо сбалансирован и при большой частоте вращения, больших осевых и умеренных радикальных усилиях работает без резких переменных нагрузок.

Современные ГТД характеризуются жёсткими условиями работы смазываемых пар трения: температура – до 300°C и выше, частоты вращения 15000...20000 об/мин. и выше.

Напряженность работы масла в таких условиях определяется количеством тепла, которое необходимо отвести от поверхности трения детали и при прочих равных условиях характеризуется скоростью прокачивания масла через двигатель.

Температура масла на входе ТРД колеблется от 20° до 70°С, а на выходе зависит от теплонапряженности двигателя. В двигателях самолетов, летающих с дозвуковыми скоростями, она не превышает +130°С, а при скорости полёта с числом М 2, а также у высокофорсированных современных двигателей дозвуковых воздушных судов гражданской авиации достигает 240°С.

Для исключения перегрева узлов трения масло непрерывно под давлением подводится к следующим узлам двигателя: подшипникам, зубчатым колесам приводов, контактными уплотнениям, шлицевым соединениям. Наиболее высокий уровень тепловыделения образуется в радиально-упорных шарикоподшипниках роторов ГТД, воспринимающих осевую нагрузку. Поэтому к ним подводят масла больше, чем к другим парам трения.

Масла для ТРД должны отвечать следующим требованиям:

- надежное смазывание всех узлов и агрегатов двигателя с минимальным износом в пределах рабочих температур от -50 до +200°С;
- полагая вязкостно-температурная характеристика и хорошая прокачиваемость при низких температурах, обеспечивающие надежный запуск двигателя без прогрева до температуры -50°С;
- однородный и стабильный фракционный состав, обеспечивающий минимальную испаряемость фракций и сохранение вязкостных характеристик масла в течение всего ресурса масла;
- высокие антиокислительные свойства и минимальное окисление в двигателе при рабочих температурах 150...200°С - минимальная вспениваемость, высокая температура самовоспламенения;
- неагрессивность по отношению к металлам, сплавам, резинотехническим изделиям, покрытиям, клеям и другим металлам;
- минимальные потери на трение при высоких частотах вращения роторов.

В наибольшей степени указанным требованиям удовлетворяют маловязкие минеральные и, в основном, синтетические масла.

К основным представителям авиационных минеральных масел относятся:

масло МС-8П – наиболее широко применяемое минеральное масло с комплексом высокоэффективных присадок. Предназначено для ГТД дозвуковых и сверхзвуковых самолетов, у которых температура масла на выходе из двигателя – не более 150°С;

масло МС-8рк – рабочее и консервационное масло на базе масла МС-8П с добавлением ингибитора коррозии. Равноценно маслу МС-8П по эксплуатационным показателям и значительно превосходит по консервационным характеристикам. При консервации маслосистем

авиационных двигателей срок защиты составляет: для масла МК-8 – 3 месяца, для масла МС-8П – 1 год, для масла МС-8рк – 4...8 лет.

Зарубежные аналоги - AeroShell Turbine Oil 3SP, TurboNicoil 321. TurboNicoil 306.

4.5.3. Масла для турбовинтовых двигателей

Особенность конструкции ТВД связана с наличием в них многоступенчатых зубчатых передач (редукторов), которые обеспечивают передачу больших потоков мощности от вала турбокомпрессора к валу воздушного винта. Зубья шестерен редукторов ТВД работают при высоких контактных напряжениях, достигающих 800...1000 МПа.

Для турбовинтовых двигателей до последнего времени широко используются маслосмеси, изготавливаемые путем смешения минеральных остаточных и дистиллятных товарных сортов масел отечественного и импортного производства, имеющих различные величины кинематической вязкости. В зависимости от пропорций смешиваемых исходных продуктов, они предназначаются для работы при разных климатических условиях эксплуатации.

Высокооборотные подшипники ротора турбокомпрессора ТВД требуют маловязкого масла, в то время как условия работы зубьев шестерен редуктора требуют высоковязкого масла с улучшенными смазывающими и противоизносными свойствами. Для смазывания этих двигателей применяют нефтяные и синтетические масла. Основными смазочными материалами являются маслосмеси, получаемые смешением авиационных масел МС-8п и МС-20 в следующих соотношениях (мас. доля, %): 75:25; 50:50; 25:75. Допускается применение масла МС-8рк в составе маслосмесей. Благодаря применению высококачественного масла МС-8п качество маслосмесей значительно повышается. Маслосмеси готовят и контролируют их качество по действующим нормативным документам.

4.6. Нормирование эксплуатационных свойств и показателей качества смазочных масел

Масла в зависимости от исходного сырья, условий производства и способа очистки могут обладать различными свойствами. Совокупность различных свойств масла определяет его качество и возможность применения для тех или иных целей. Величины основных физико-химических параметров масел регламентируются стандартами (сертификатами качества), которые дают представление о возможности поведения масла в процессе эксплуатации и служат для контрольных проверок качества масла путем сопоставления опытных данных с техническими условиями.

Кроме классификации моторных масел по классам и категориям, классификации по вязкости изготовитель масла сообщает потребителю и другие физико-химические характеристики моторных масел.

4.6.1. Вязкостные свойства масел

Вязкостные свойства масел (вязкость и индекс вязкости) являются важнейшими характеристиками смазочных масел. С ними связаны также плотность масла, его температура застывания и проворачиваемость при низких температурах окружающей среды (холодный запуск). Они определяют возможность обеспечения жидкостного трения, эффективность охлаждения, легкость пуска, прокачиваемость масла по системе смазки и т.д.

Вязкость масла характеризуют обычно в единицах кинематической вязкости и определяют с помощью капиллярного вискозиметра. За единицу кинематической вязкости ($1 \text{ м}^2/\text{с}$ в системе СИ) принимают вязкость масла, имеющего динамическую вязкость в $1 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ (Па·с) и плотность $1 \text{ кг}/\text{м}^3$. В технике используют также единицу измерения кинематической вязкости по системе размерностей СГС – стокс (Ст), причем $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$ (применяют и единицу, в 100 раз меньшую стокса, - сантистокс: $1 \text{ сСт} = 0,01 \text{ см}^2/\text{с} = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$). При выборе вязкости авиационного масла исходят из двух основных требований:

- обеспечение низкотемпературного запуска двигателя;
- оптимизация рабочей вязкости (на прогревом двигателе), за которую принимают вязкость масла при температуре 100°C . Величина рабочей вязкости по верхнему пределу определяется уровнем потерь мощности на трение и циркуляцию масла. При большей вязкости ухудшаются прокачиваемость масла (в особенности на режиме пуска) и смазка поверхностей трения разбрызгиванием (барботажем) и самотеком, в результате чего может возникнуть масляное голодание и повышенный износ узла.

Вязкость масла зависит от химического состава, давления и температуры. Зависимость вязкости масла от давления заметно проявляется при его значениях выше $5 \text{ МН}/\text{м}^2$ и усиливается при понижении температуры. Изменение вязкости с изменением давления необходимо учитывать при расчете подшипников современных двигателей, у которых давления могут достигать $90... 100 \text{ МН}/\text{м}^2$.

Зависимость вязкости масла от температуры называют **вязкостно-температурной характеристикой**. При более пологой вязкостно-температурной кривой качество масла выше, т. к. при пониженных температурах оно свободно течет по трубопроводам, а при высоких - сохраняет достаточную вязкость для надлежащей смазки узлов трения (рис. 4.3).

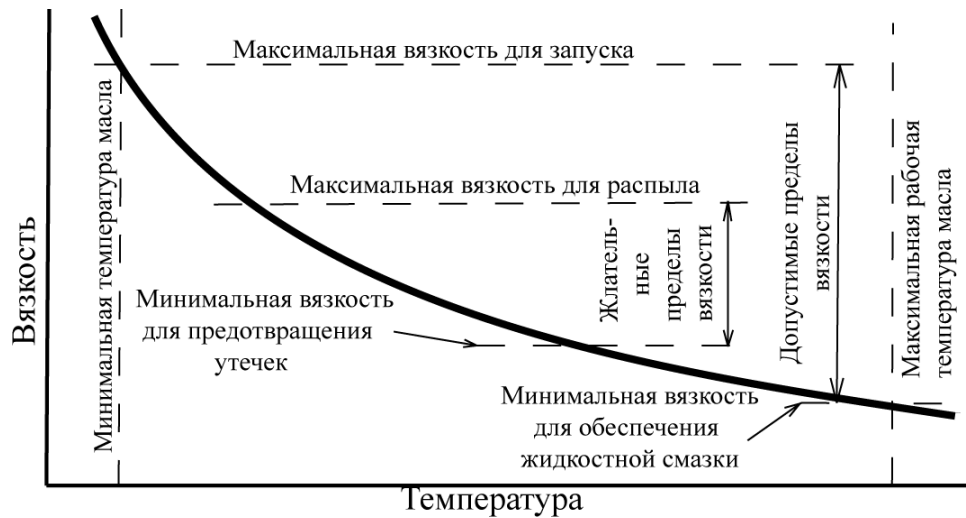


Рис. 4.3. Рабочий диапазон вязкости моторного масла по температуре

Наиболее распространенным способом оценки вязкостно-температурных свойств смазочных масел по нормативным документам является показатель **индекса вязкости (ИВ)**. Чем он больше, тем масло лучше, так как меньше изменяется его вязкость по температуре. Метод определения индекса вязкости изложен в ГОСТ 25371-97.

Индекс вязкости (ИВ) - эмпирическая величина, которая определяется путем сравнения характеристик испытуемого масла с двумя эталонными маслами двух серий, которые имеют вязкость, одинаковую с вязкостью испытуемого масла при заданной температуре. Первая серия включает масла, обладающие пологой вязкостно-температурной кривой (индекс вязкости принят за 100), а вторая серия состоит из масел с плохими вязкостно-температурными свойствами (индекс вязкости принят за 0). Эталонные масла одной и той же серии отличаются друг от друга только величиной вязкости. ИВ можно определить расчетным или графическим способом.

При наличии характеристик эталонных масел ИВ (VI) вычисляют по формуле:
индекс вязкости (VI) нефтепродукта

$$VI = \frac{L - U}{L - H} \cdot 100; \quad (4.5)$$

$$VI = \frac{L - U}{D} \cdot 100, \quad (4.6)$$

где U - кинематическая вязкость при 40 °С нефтепродукта, индекс вязкости которого требуется определить ($D = L - H$), мм²/с;

L и H - эмпирические величины, которые приведены в [8] и влияют на определение индекса вязкости.

При величинах ИВ, превышающих значение 100, его величину вычисляют по методу Б ГОСТ 25371-97 с помощью логарифмов величин, входящих в расчетную формулу, используемую в методе А ГОСТа.

Графически ИВ можно определить, используя значения вязкости масла при 50°C и 100°C и номограмму (рис. 4.4).

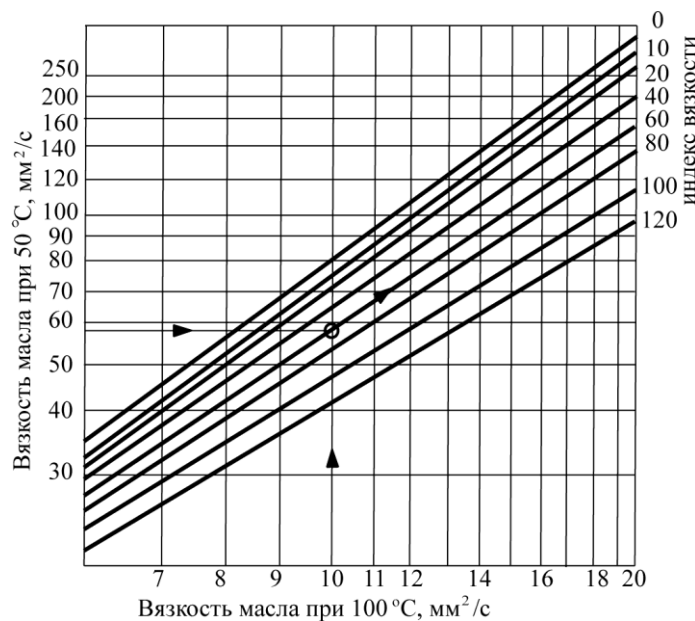


Рис. 4.4. Номограмма для определения индекса вязкости моторного масла Для

нахождения индекса вязкости необходимо отложить на вертикальной шкале значение вязкости масла при 50°C, а на горизонтальной - значение вязкости при 100°C, и из полученных точек восстановить перпендикуляры до взаимного пересечения.

При прочих равных показателях лучшее масло обладает более высоким индексом вязкости и оно более пригодно для эксплуатации в зимних условиях.

С возрастанием температуры вязкость масла снижается (масло разжижается), а при ее понижении вязкость увеличивается (масло густеет). Масло с низким индексом вязкости в холодном двигателе настолько загустевает, что на преодоление внутреннего трения самого масла уходит слишком много энергии. Из-за медленного притока масла при запуске и разогреве двигателя трущиеся детали сильно изнашиваются. При высоких температурах и невысоком индексе вязкости вязкость моторного масла может уменьшиться настолько, что оно не образует прочную плёнку.

Для улучшения вязкостно-температурных свойств масел в них добавляют специальные **вязкостные присадки**, например, полиизобутилен с молекулярной массой 15000...20000. Добавка 2% полиизобутилена повышает вязкость масла при 100°C примерно в два раза. Кроме того, вязкостная добавка улучшает структуру минерального масла. При производстве современных авиационных масел во всем мире используют зарубежные загущающие присадки фирм Lubrizol и Comad.

Минеральные масла не имеют определенной, четко выраженной температуры перехода из жидкого состояния в твердое (из-за своего фракционного состава). Поэтому температурой застывания (потерей текучести)

условно считается та, при которой поверхность масла, охлаждаемого в стандартной пробирке, после наклона под углом в 45°C остается неподвижной в течение одной минуты. Несмотря на несовершенство этого показателя, по нему можно с достаточной для практики точностью судить о низкотемпературных свойствах масла.

Для понижения температуры застывания масел и улучшения низкотемпературной текучести применяют специальные присадки, называемые **депрессорами**. Их действие основано на том, что они затрудняют или прекращают кристаллизацию парафиновых углеводородов в масле при низких температурах.

4.6.2. Смазочные свойства

Под смазывающей способностью масла (маслянистостью) понимают способность веществ, входящих в его состав, образовывать на трущихся поверхностях прочную молекулярную пленку, которая препятствует непосредственному соприкосновению этих поверхностей. Это свойство масла особенно важно в условиях граничного трения.

Маслянистость масел зависит от их химического состава. Присутствие в маслах жирных кислот и других поверхностно-активных соединений повышает их маслянистость, поэтому, чем лучше очищено минеральное масло, тем хуже его маслянистость. В стандартах на смазочные масла показатель маслянистости отсутствует, так как еще не разработаны стандартные методы его определения. Однако на практике для оценки смазывающей (трибологической) способности масел пользуются специальными **четырёхшариковыми машинами трения (ЧМТ)**, в которых прочность масляной пленки определяется по ряду характеристик (диаметру пятна износа D_i , индексу задира Из, усилию сваривания P_s). Испытания проводятся при заданных стандартных условиях испытания, приведенных в нормативной документации на каждый вид масла. Чем выше нормативы по этим показателям, тем лучшей смазывающей способностью обладает испытываемое масло.

Для повышения смазывающих свойств масел применяют специальные противоизносные и противозадирные присадки.

4.6.3. Коррозионная стабильность масел

Коррозионные свойства масел определяются присутствием кислот, щелочей, воды, а также их очисткой в процессе производства от присутствия следов сероводорода и меркаптанов. При работе двигателя создается сочетание условий, интенсифицирующих коррозию конструкционных материалов, - высокие температуры и давления в присутствии химически активных коррозионно-агрессивных веществ. Коррозионную агрессивность масел обуславливают содержащиеся в них в виде примесей водорастворимые кислоты, образующиеся из оксидов азота и серы. Коррозионная агрессивность

содержащихся в масле органических кислот возрастает в присутствии воды. Особенно интенсивной коррозии подвергаются свинец и цветные металлы, входящие в антифрикционные сплавы.

Кислотное число – характеристика кислотности масел, которая выражается количеством миллиграммов едкого калия на 1 грамм масла (мг КОН/г), требующегося для нейтрализации всех типов кислот, содержащихся в 1 грамме анализируемого продукта. Кислотное число указывает на содержание в масле как свободных, так и связанных кислот (нефтеновых). В процессе эксплуатации кислотные свойства масел возрастают.

Исключительно вредным является наличие в масле минеральных **водорастворимых кислот и щелочей**. Эти кислоты вызывают коррозию всех металлических поверхностей, щелочи сильно разрушают детали, изготовленные из цветных металлов. Поэтому техническими условиями в некоторых сортах масел допускаются лишь их следы. В трансмиссионных маслах водорастворимые кислоты и щелочи недопустимы.

Содержание воды в маслах является не менее опасным. Вода ухудшает смазывающие свойства масел, корродирует трущиеся детали, способствует образованию осадков и вспениванию масла. При низких температурах вода замерзает и препятствует подаче масла к узлам трения. Повышение антикоррозионных свойств масел достигается улучшением их химической стабильности, препятствующей образованию кислых продуктов, и применением **антикоррозионных присадок** или **ингибиторов**. В качестве ингибиторов коррозии масел используют эфиры нефтеновых и жирных кислот, сульфаты металлов, аминокислоты и др. Основными элементами, включаемыми в антикоррозионные присадки, долгое время являлись сера, фосфор, а также алкилфенольные и фенольные соединения с различными функциональными группами, сульфонаты, нитрированные нефтепродукты, сукцинимиды и т.д. В качестве компонентов антикоррозионных присадок для нефтяных масел в прошлом наиболее часто использовались диалкилтиофосфаты металлов; для синтетических – меркаптобензотиазол (сероорганическое азотсодержащее соединение), обладающий также свойствами противозадирной и антиокислительной присадки. Однако в современных рецептурах масел они заменяются новыми менее токсичными присадками, в которых серу и фосфорорганические соединения заменили азотсодержащими, которые имеют гораздо лучшие экологические характеристики (например, сукцинимидные присадки). Практически все типы антикоррозионных присадок обладают также антиокислительными, противоизносными и противозадирными свойствами, то есть являются многофункциональными присадками.

4.6.4. Стабильность масел

Под стабильностью масла понимают его способность сохранять показатели качества в пределах определенных допусков в заданных условиях эксплуатации. Различают химическую и физическую стабильность масел.

Химической стабильностью масел называется их способность противостоять изменению свойств под воздействием кислорода воздуха и повышенных температур при хранении, транспортировке и использовании в двигателе. Она зависит от химического состава масла, температуры, длительности окисления, влияния катализаторов и т.д. Высокой стабильностью обладают синтетические смазочные масла (силиконы, фторуглеродороды и др.).

Минеральные масла при нормальной температуре практически не окисляются, но с повышением температуры, особенно в присутствии каталитически активных примесей, скорость и глубина их окисления сильно возрастают.

В процессе окисления в масле образуются совершенно новые продукты: кислоты, смолы асфальтены и др. Часть масла, находясь в зоне высоких температур (поршневая группа и т.д.), превращается в нагар и лаковые (смолистые) отложения. В масле продукты окисления образуют осадки (шлам). Последние изменяют цвет масла, вызывают коррозию и загрязняют двигатель. Пленка лака, являясь плохим проводником тепла, приводит, например, к перегреву поршневой группы и, как следствие, к заеданию поршневых колец и другим опасным последствиям.

Химическую стабильность масел оценивают по устойчивости против окисления, термоокислительной способности и моющим свойствам.

Термоокислительная стабильность и моюще-диспергирующие свойства смазочных масел характеризуются изменением **кислотности, вязкости, коксуемости, зольности и содержанием смол**. Так, например, коксуемость (**коксовое число**) масла может косвенно служить количественным показателем способности масла образовывать нагар в камере сгорания двигателя под воздействием высоких температур.

Физическая стабильность масла определяется его способностью сохранять заданный фракционный состав и физическую гомогенность (фазовую однородность). Фракционный состав масла изменяется вследствие его испарения во время работы двигателя. При повышении температуры масла в первую очередь испаряются легкокипящие фракции. Остающиеся тяжелые фракции обладают повышенной вязкостью и склонностью к осадкообразованию.

Экспериментальное определение фракционного состава смазочного масла затруднено из-за того, что его перегонка должна производиться под вакуумом (во избежание термического разложения). Поэтому оценка физической стабильности масла осуществляется по косвенному параметру - температуре вспышки паров масла.

Температура вспышки - это минимальная температура, до которой нужно нагреть масло в специальном приборе, чтобы пары его образовали с воздухом смесь, мгновенно воспламеняющуюся от контакта с поднесенным к нему источником открытого пламени. При этом горение паров топлива прекращается после удаления источника пламени. Эта температура определяется аналогичной характеристикой базового масла, а также составом пакета присадок.

Температура вспышки масел зависит от их химического состава - структуры молекул базовых компонентов. Для масляных фракций она обычно увеличивается с повышением плотности и вязкости (уменьшается количество легко испаряемых компонентов).

Температура вспышки существенно снижается по сравнению с исходным значением в процессе работы. Масло может разжижаться топливом из-за неисправности двигателя. В сочетании со снижением вязкости масла понижение температуры вспышки служит сигналом для поиска неисправностей системы подачи топлива, системы зажигания в поршневых двигателях. В исправном двигателе масло с высокой температурой вспышки практически не расходует в пределах разрешённого интервала замены.

Температура вспышки масел определяется при помощи прибора определения температуры вспышки в закрытом тигле или в приборе определения температуры вспышки в открытом тигле, в соответствии с методом определения, записанном в нормативной документации на каждую марку масла. Одновременно она характеризует также пожаробезопасность масла.

При старении масла может происходить его коллоидная дестабилизация - расслоение масла и выпадение осадка, т.е. нарушение физической однородности масла. Это явление характеризуется показателем моюще- диспергирующих свойств, которые препятствуют возможности образования больших сгустков смолистых веществ, заметно снижающих условия смазки узлов трения. Выше говорилось о том, как с этим бороться с помощью моюще- диспергирующих присадок.

Изменение цвета масла в процессе эксплуатации косвенно характеризует степень его окисления или загрязнения.

4.7. Синтетические масла

Минеральные масла имеют ограниченные эксплуатационные свойства, ввиду неудовлетворительных вязкостно-температурных характеристик и малой стабильности при высоких температурах и давлениях. Поэтому последние десятилетия всё более широкое применение находят синтетические масла с заранее заданными характеристиками.

Основное отличие синтетических масел от минеральных состоит в том, что в отличие от минеральных масел, основы которых являются продуктами нефтепереработки, синтетические представляют собой практически

одинаковые молекулы, являющиеся продуктами нефтехимического синтеза. Благодаря этому, физико–химические свойства и стабильность синтетических масел значительно выше, чем у минеральных.

Основные классы основ синтетических масел перечислены в разделе 4.3 настоящего пособия.

Ассортимент синтетических масел и их зарубежные аналоги

Обсуждая ассортимент синтетических авиамасел необходимо иметь в виду, что в последние годы, в связи с существенным обновлением парка воздушных судов гражданской авиации за счет закупки зарубежной техники, спрос на отечественные авиамасла существенно уменьшился за счет их повсеместной замены импортными аналогами. Однако остается надежда, что эта тенденция со временем будет переломлена и на наших авиалиниях вновь будут летать воздушные суда российского производства и производство отечественных масел возобновится.

Масло ИПМ-10 (ТУ 38.101299-90) – синтетическое углеводородное с комплексом высокоэффективных присадок. Работоспособно в интервале температур от -50°C до $+200^{\circ}\text{C}$. 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 года 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°C , а также в авиационных турбохолодильниках в качестве унифицированного сорта масла и в других агрегатах. Можно использовать для недлительной консервации. В качестве зарубежного аналога применяется масло TURBONICOIL 210a (TN-210a), а также более современные образцы масел TURBONICOIL 400 (TN-400) и TURBONICOIL 600 (TN600).

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 60-х годах было разработано и допущено к применению масло ВНИИНП 50-1-4ф, обладающее хорошими низкотемпературными свойствами и термостабильное до $175-180^{\circ}\text{C}$.

Применяют в двигателях с температурой масла на выходе до 175°C и в турбохолодильниках. Зарубежные аналоги AeroShell Turbine Oil 390, AeroShell Turbine Oil 560, BP Turbo Oil 2380 (BP TO 2380), BP Turbo Oil 2197 (BPTO 2197).

Масло ВНИИ НП-50-4-у (ТУ 38.401-58-12-91) – 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 ВНИИ НП-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. Зарубежные аналоги AeroShell Turbine Oil 390, AeroShell Turbine Oil 560, BP Turbo Oil 2380 (BP TO 2380), BP Turbo Oil 2197 (BPTO 2197).

Масло Б-3В (ТУ 38.101295-85) – синтетическое масло на основе сложных эфиров пентаэритрита и жирных кислот C₅-C₉ 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. Зарубежный аналог AeroShell Turbine Oil 560, BP Turbo Oil 25 (BPTO 25), Castrol 98.

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 пентаэритрита и СЖК фракции C₅-C₉ 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. Зарубежный аналог Aero-Shell Turbine Oil 560, BP Turbo Oil 2389 (BP TO 2389).

Масло ЛЗ-240 (ТУ 301-04-010-92) - синтетическое на основе сложных эфиров пентаэритрита и жирных кислот с комплексом присадок. Рекомендуется для использования в тех же двигателях, в которых применяется масло Б-3В. Зарубежный аналог AeroShell Turbine Oil 560, BP Turbo Oil 2389 (BP TO 2389), Castrol 98.

Масло ПТС-225 (ТУ 38.401-58-1-90) - синтетическое высокостабильное на основе сложных эфиров пентаэритрита и синтетических жирных кислот C₅- C₉. Работоспособно в интервале температур от -60° до +225°С. Рекомендовано к применению в теплонапряженной авиационной технике в качестве унифицированного масла для отработки новых теплонапряженных авиационных ГТД (ТРД, ТВД, ТВВД, турбовальных двигателей и редукторов 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. Зарубежный аналог AeroShell Turbine Oil 500.

Масло ВТ-301(ТУ 38.101657-85) - синтетическое на основе кремнийорганических 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 агрессивны к большинству конструкционных авиационных материалов. К недостаткам масла следует отнести сравнительно невысокие противоизносные свойства, сложность технологии изготовления и, как следствие этого, чрезмерно высокую стоимость. Зарубежных аналогов не имеет.

Масло ВНИИМП-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 ВНИИМП-25. Работоспособно при температуре окружающей среды от -50° до +60°С. Представляет собой смесь синтетического ПАО и диэфиров с комплексом присадок.

4.8. Пластичные смазки

4.8.1. Назначение, состав и структура пластичных смазок

Пластичные смазки представляют собой смазочные материалы, специальным образом загущенные для того, чтобы обеспечить смазку, консервацию и уплотнение тех узлов трения и деталей, для которых создать принудительную циркуляцию обычной жидкой смазки нецелесообразно или невозможно из-за особых условий работы и конструкции узла трения.

Пластичные смазки по консистенции занимают промежуточное положение между жидкими маслами и твердыми смазочными материалами. Они представляют собой коллоидные системы (твердые или полутвердые гели), характеризующиеся высокой концентрацией дисперсной фазы. Высокая степень структурирования дисперсной фазы придает смазкам пластичность, упругость и ряд других свойств, благодаря которым они существенно отличаются от жидких смазывающихся материалов. Смазка при невысокой температуре и отсутствии нагрузки сохраняет первоначальный вид и ведет себя подобно твердым телам: не растекается под действием собственной массы, удерживается на вертикальных поверхностях и не сбрасывается инерционными силами с движущихся деталей.

Однако уже при сравнительно малых нагрузках, превышающих предел прочности структурного каркаса, и при нагреве смазка начинает разрушаться – течь как пластичное тело, но при этом из зоны трения она не вытекает и через уплотнения не просачивается. При снятии нагрузки течение прекращается, и смазка вновь приобретает свойства твердого тела. В этом и заключается преимущество применения смазок по сравнению с жидкими смазывающимися материалами.

Основные функции пластичных смазок не отличаются от функций жидких масел и состоят в следующем: уменьшение силы трения между перемещающимися друг относительно друга поверхностями; снижение износа и предотвращение задира (заедания) трущихся поверхностей; уплотнение зазоров между сопряженными деталями.

Специфика смазок заключается лишь в области их применения:

- пригодность для смазывания сильно изношенных пар трения;
- возможность использования в негерметизированных или открытых узлах;
- способность прочно держаться на смазываемых поверхностях;
- длительные сроки эксплуатации и хранения и пр.

По сравнению с маслами пластичные смазки имеют ряд преимуществ:

- малый удельный расход (иногда в сотни раз меньший);
- более простая конструкция машин и механизмов (что снижает массу, повышает надежность и ресурс работы);
- более продолжительный период «межсмазочных» стадий;

- значительно меньшие эксплуатационные затраты при обслуживании техники.

Применение пластичных смазок более эффективно в условиях высоких температур и контактных нагрузок, в узлах трения, работающих периодически или с частыми остановками.

К недостаткам смазок следует отнести:

- отсутствие отвода теплоты и продуктов износа от смазываемых деталей;
- более сложную систему подачи пластичного смазочного материала к узлу трения;

- низкую химическую стабильность мыльных смазок, что приводит к их повышенной окисляемости и ухудшению эксплуатационных свойств.

Пластичные смазки, представляющие собой мазеобразные продукты, получают добавлением в масляную основу различных загустителей, под действием которых масло становится малоподвижным. Они состоят из пространственного структурного каркаса, образованного твердыми частицами **загустителя** (дисперсная фаза – в зависимости от класса смазки содержание загустителя в ней может составлять от 5% до 30 % ее массы) и **жидкого масла**, включенного в ячейки этого твердого каркаса (дисперсионная среда – 70...90 %).

В качестве основы применяются минеральные и синтетические масла.

Загустителями могут служить соли жирных высокомолекулярных кислот (мыла), твердые углеводороды (церезины, петролатумы) и некоторые продукты неорганического (бентонит, силикагель) или органического (пигменты, кристаллические полимеры, производные карбамида) происхождения. Наиболее распространенные загустители – металлосодержащие мыла и твердые углеводороды. Концентрация мыльного и неорганического загустителя обычно не превышает 15 %, а концентрация твердых углеводородов доходит до 25 %.

Кроме основы смазки и загустителя пластичные смазки включают специальные добавки, необходимые для улучшения эксплуатационных свойств (для регулирования структуры и улучшения функциональных свойств). К ним относятся:

- **наполнители** – твердые вещества, как правило, неорганического происхождения, нерастворимые в масле (графит, дисульфит молибдена, слюда и др.). Они улучшают антифрикционные и герметизирующие свойства и могут составлять 10...15 % от массы смазки;

- **модификаторы структуры** – поверхностно-активные вещества (спирты, кислоты и др.). Способствуют формированию более прочной и эластичной структуры смазки и составляют 1 - 2 % от массы смазки;

- **присадки** – малорастворимые поверхностно-активные вещества, добавляемые в количестве 1 - 5 % от массы смазки. Преимущественно те же, что используются в товарных маслах; антиокислители, стабилизаторы, ингибиторы коррозии.

Кроме того, смазки обычно содержат некоторое количество воды, играющей роль стабилизатора.

Особенностью пластичных смазок является обратимость процесса разрушения структурного каркаса: под действием больших нагрузок каркас разрушается, и смазка работает как жидкость; при снятии нагрузки каркас восстанавливается, и смазка вновь приобретает свойства твердого тела.

Способность дисперсных систем обратимо разжижаться при механическом воздействии и отвердевать при относительно длительном их пребывании в покое носит название **тиксотропия**. Тиксотропные свойства пластичных смазок имеют большое эксплуатационное значение. Положительным качеством, обусловливаемым тиксотропией, является то, что при выбрасывании частиц разжиженной смазки из зоны трения и отложения их на неподвижных поверхностях они увеличивают вязкость и автоматически герметизируют узел трения от дальнейшего вытекания пластичной смазки.

4.8.2. Классификация пластичных смазок и требования к ним

Пластичные смазки различают по области применения, по типу основы, по природе загустителя, по консистенции (густоте).

По назначению смазки подразделяются:

- **антифрикционные** общего назначения и антифрикционные технологические – для облегчения технологических процессов обработки металлов давлением;
- **консервационные (защитные)** – для предохранения металлических изделий от коррозии;
- **уплотнительные** – для герметизации трущихся поверхностей, сальников, щелей, зазоров и других деталей;
- **специального назначения**, например, фрикционные – для увеличения трения с целью предотвращения проскальзывания поверхностей;
- **прирабочные** – для улучшения приработки трущихся поверхностей деталей и другие.

подавляющее большинство смазок относится к первым двум группам, причем на автотранспорте применяют, как правило, первую группу.

По типу **основы** смазки бывают на нефтяных, синтетических, растительных маслах, на смеси вышеперечисленных масел.

По типу **загустителя** смазки делят на мыльные, углеводородные, органические и неорганические.

Пластические смазки подразделяются по типу применяемого металлосодержащего **мыла** (соли высших карбоновых кислот) на кальциевые, натриевые, литиевые, алюминиевые и др. Поскольку тип и количество загустителя (до 30% массы) определяют эксплуатационные свойства смазки, поэтому в ее названии, как правило, он присутствует: кальциевая смазка, литиевая смазка и т.п.

4.8.3. Эксплуатационные свойства и показатели качества пластичных смазок

Эксплуатационные свойства смазок связаны с отдельными показателями их физико-химических свойств. Основными свойствами пластичных смазок, по которым можно производить сравнительную оценку их качества и предугадывать работоспособность, являются: предел прочности, эффективная вязкость, пенетрация, температура каплепадения, коллоидная и химическая стабильность, коррозионные свойства (водостойкость, кислотостойкость, содержание кислот, щелочей, воды), содержание механических примесей.

Из всех показателей качества смазок основные - это температура каплепадения и уровень пенетрации. Потому именно они являются выходными параметрами для оценки и сравнения смазок друг с другом.

Пластические свойства смазок

Предел прочности, эффективная вязкость и пенетрация характеризуют пластические свойства смазок при воздействии на них внешних сил.

Пределом прочности при сдвиге называется соответствующее этому переходу напряжение сдвига смазки. Это минимальная нагрузка, при которой происходит необратимое разрушение каркаса смазки и она ведет себя как жидкость. В рабочем интервале температур предел прочности пластичных смазок составляет от 0,1 до 3 кН/м² (рис. 4.5).

Когда на смазку действует усилие, превышающее предел прочности на сдвиг, она течет, и ее свойства в этом случае (величина потерь на внутреннее трение в смазке) характеризуются **эффективной вязкостью**, т. е. внутренним трением между взаимоперемещающимися слоями. Фактически эта величина определяет пусковые характеристики механизмов, легкость подачи и заправки в узлы трения.

При повышении градиента скорости деформации вязкость пластичных смазок уменьшается до некоторой минимальной величины (рис. 4.5).

Кривая изменения вязкости с изменением скорости сдвига при постоянной температуре характеризует вязкостные свойства смазки: чем круче кривая, тем лучше смазка. При постоянном градиенте скорости деформации вязкость смазки изменяется только с изменением температуры.

Пенетрация - число проницаемости (в 0,1 мм), которое характеризует консистенцию (степень мягкости) пластичных смазок и является показателем глубины погружения (проникновения) в испытуемую смазку конуса стандартных размеров. В приборе, называемом **пенетрометром**, пенетрация определяется числом делений, отмечаемых стрелкой на шкале индикатора прибора, и соответствует числу десятых долей миллиметра глубины погружения конуса в смазку.

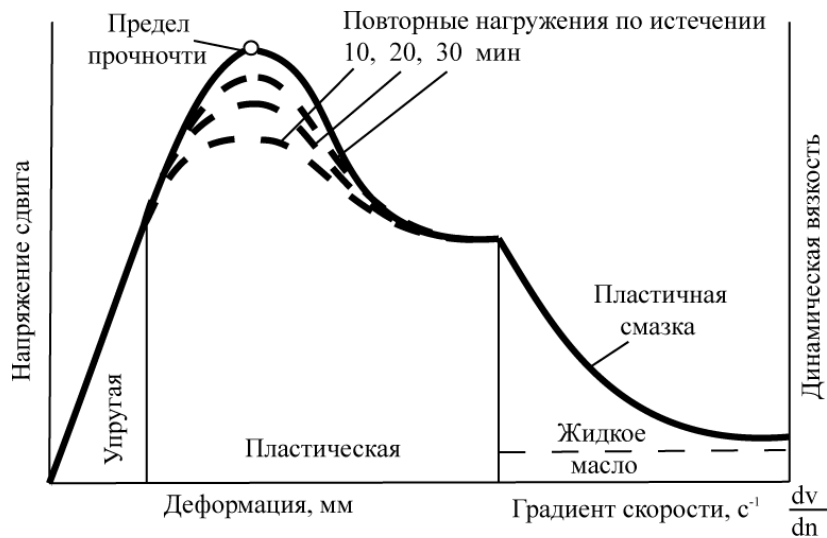


Рис. 4.5. Зависимость между нагрузкой и градиентом скорости

Чем больше число пенетрации, тем мягче смазка и, следовательно, меньше ее консистенция. Для пластичных смазок ее значение находится в пределах 170...400 единиц.

4.8.4. Стабильность смазок

Различают физическую и химическую стабильность пластических смазок. Показателями физической стабильности являются тиксотропные свойства, температура каплепадения смазки и коллоидная стабильность.

Механическая стабильность характеризуется тиксотропными свойствами, т.е. способностью смазок практически мгновенно восстанавливать свою структуру (каркас) после выхода из зоны непосредственного контакта трущихся деталей. Благодаря этому уникальному свойству смазка легко удерживается в негерметизированных узлах трения.

Температура каплепадения - условный критерий начала плавления: минимальная температура падения первой капли смазки, нагреваемой в капсуле термометра Уббелюде (метод ASTM D556 - IP132; ISO 2/76; DIN 5/80/B1.1).

Под **коллоидной стабильностью** понимают стойкость консистентных смазок к выделению части входящего в их состав масла (синерезису) в процессе механического и температурного воздействия при применении, хранении и транспортировке.

Оценку коллоидной стабильности производят на специальном приборе, где слой смазки с нагрузкой прижимают в течение 30 мин. к слою фильтровальной бумаги, положенной на стекло. По количеству масла, перешедшему из смазки на бумагу (в процентах по массе), судят о коллоидной стабильности смазки. Чем больше масла окажется на бумаге, тем коллоидная стабильность смазки хуже.

Химической стабильностью называют устойчивость смазки к окислению кислородом воздуха в условиях применения и при хранении. В

результате окислительных процессов в смазках образуются свободные кислоты, корки и уплотнения на поверхности. Кроме этого, окисление смазок вызывает изменение их механических свойств (предела прочности, вязкости и т.д.) и повышает коррозионную активность.

Кроме того, у смазок оценивают:

- **термическую стабильность** - способность смазки сохранять свои свойства при воздействии повышенных температур;

- **испаряемость** - количество масла (в %), испарившегося из смазки за определенный промежуток времени при ее нагреве до максимальной температуры применения;

- **водостойкость** - характеристику устойчивости смазки к растворению в воде, способности поглощать влагу, проницаемости смазочного слоя для паров влаги и смываемости водой со смазываемых поверхностей.

4.8.5. Ассортимент и краткая характеристика пластичных смазок

Рассмотрим состав, области применения и основные свойства пластических смазок, допущенных к применению на серийной авиационной технике гражданской авиации, а также смазки, рекомендуемые для вновь разрабатываемой авиатехники.

Смазка ЦИАТИМ – 201 - заменители Эра, ЦИАТИМ-221 является первой отечественной литиевой смазкой. Готовится загущением маловязкого минерального масла МВП десятью процентами стеарата лития с добавлением 0,3 % дифениламина. Используется как основной сорт низкотемпературной смазки в системах управления для смазки подшипников качения и скольжения, шарниров, ползунов, небольших редукторов, органов управления тормозными щитками, узлами подвески рулей, элеронов, закрылков, замков шасси, соединений тяг и качалок. Не рекомендуется для применения в условиях длительного прямого контакта с водой и при относительной влажности более 80%, для тяжело нагруженных узлов трения скольжения, для кратковременной и длительной консервации изделий. Смазка должна применяться при температурах, не выходящих за предел диапазона $-60 \dots +90^{\circ}$. Зарубежные аналоги - Aeroshell Grease 6 (SHELL), Unirex S 2 (Esso), Eneyrease LCI, LT 2 (British Petroleum)

Смазка СТ (НК-50) – заменитель - Сапфир антифрикционная пластичная высокотемпературная смазка. Изготавливается на основе масла МС- 20 , загущённого натриевыми мылами (31 %), саломаса и технического сала. В её состав входит 0,5 процента коллоидного графита.

Смазка имеет плохие низкотемпературные свойства. Гигроскопична. Растворима в воде. При хранении в негерметичной таре поглощает влагу из воздуха, что ухудшает её характеристики. Имеет низкую испаряемость, высокую температуру каплепадения. Работоспособна при температуре $- 20^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$, с кратковременным перегревом до 200°C .



Рекомендуется для высоконагруженных узлов трения. Используется в подшипниках колёс шасси самолётов и вертолётов, в шлицевых соединениях воздушных винтов самолётов и вертолётов, резьбовых соединениях. Зарубежные аналоги AeroShell Grease 22, AeroShell Grease 16, Mobil Grease 28.

Смазка ВНИИ НП-231 заменитель ВНИИ НП-246 – антифрикционная пластичная высокотемпературная смазка.

Готовится загущением полисилоксановой жидкости ПЭС-С-2 канальной сажей ДГ-100.

Обладает хорошими низкотемпературными свойствами, имеет высокие противозадирные характеристики. По своему составу и свойствам занимает промежуточное положение между пластичными смазками и неструктурированными текучими пастами. Смазка работоспособна при температуре $-60^{\circ}\text{C} \dots + 250^{\circ}\text{C}$, кратковременно до плюс 300°C .

Рекомендуется для применения в тихоходных высоконагруженных узлах трения: закрытых червячно-винтовых механизмах, для смазывания подшипников качения и скольжения и т.д. Используется в узлах трения системы управления летательными аппаратами.

Смазка ВНИИ НП - 242 - заменитель Фиол-2М - антифрикционная пластичная водостойкая смазка. Получается при загущении масла индустриального 45 стеаратом лития. Содержит антиокислитель - дифениламин и противоизносную присадку - дисульфид молибдена.

Предназначается для смазывания шариковых и роликовых подшипников, работающих при больших нагрузках. Смазка рекомендуется для применения в подшипниках электромашин горизонтального исполнения с редко сменяемой смазкой. Работоспособна при температуре $-30^{\circ}\text{C} \dots +110^{\circ}\text{C}$, кратковременно до $+120^{\circ}\text{C}$.

Смазка ВНИИ НП-286М - заменитель ВНИИ НП-274 - готовится загущением синтетического масла МАС-35 мылами, содержит композицию антиокислительных и противоизносных присадок. Смазка работоспособна при температуре $-60^{\circ}\text{C} \dots +120^{\circ}\text{C}$. Рекомендуется для смазки зубчатых передач средней мощности, в электромеханизмах, подшипниках качения с высокими скоростями вращения, в подшипниках качения систем управления самолётом. Используется вместо смазок ЦИАТИМ-201, ЦИАТИМ-203, ОКБ-122-7, ВНИИ НП-242 на вновь разрабатываемой авиатехнике. Зарубежный аналог Nycogrease GN 22, Mobil Grease 28.

Смазка ВНИИ НП-261- Сапфир представляет собой смесь синтетического масла МАС-35 + эфир-2, загущенную комплексным мылом и пигментом. Содержит графит и присадки ИОНОЛ и ФАНА. Работоспособна при температуре -45° . Рекомендуется для смазки подшипников колёс шасси самолетов вместо смазки СТ (НК-50). Зарубежные аналоги AeroShell Grease 22, AeroShell Grease 16, Mobil Grease 28.

Паста ВНИИ НП-225 - антифрикционная. Получается при смешивании кремнийорганической жидкости ПФМС-4 с дисульфидом молибдена.

Предназначается для защиты резьбовых соединений от заеданий. Применяется в резьбовых соединениях между прокладками из естественной и искусственной резины. Применяется как сухая смазка.

Работоспособна при температуре: как антифрикционная до 250°C и как твердая сухая паста до 450°C-500°C. Зарубежный аналог Molykote 50/50.

4.8.6. Консервационные масла и смазки

Масло К-17 - консервационное жидкое, влагостойкое масло (смазка). Получается при загущении смеси нефтяных масел (трансформаторного и авиационного МС-20) литиевым мылом окисленного петролатума. Содержит присадки ЦИАТИМ-339, ПМСЯ, дифениламин и СК-45.

Предназначается для длительной консервации в условиях повышенных температур и влажности, для консервации внутренних и наружных поверхностей изделий из цветных и чёрных металлов. Применяется для долговременной защиты от атмосферной коррозии наружных поверхностей изделий и механизмов, хранящихся под укрытием и на открытых площадках. Используется для внутренней консервации поршневых авиационных двигателей. Зарубежный аналог Nycolube 20.

Смазка ПВК - консервационная смазка. Готовится при сплавлении петролатума, масла цилиндрического II, церезина. Содержит присадку МНИ-7. Водостойкая с хорошими защитными свойствами. Стабильна при хранении. Рекомендуется для наружной консервации изделий из чёрных и цветных металлов. Чтобы нанести смазку на защищаемые детали, необходимо окунуть их в расплавленную смазку при 100 - 120°C.

Смазка АМС-3 - защитная (консервационная) смазка, водостойкая, очень густая, липкая. Стабильна при хранении. Смазка готовится при загущении высоковязкого масла Вапор алюминиевым мылом олеиновой и стеариновой кислот.

Рекомендуется для наружной консервации изделий из чёрных и цветных металлов, когда защищаемый от коррозии механизм может длительно соприкасаться с водой.

Смазка наносится только путём намазывания при температуре 0°C. Ниже 0°C вязкость смазки сильно возрастает, что затрудняет её нанесение и использование в качестве антифрикционной смазки. Как антифрикционная смазка может применяться при температуре 0°C...60°C.

5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

Гидросистемы современных воздушных судов обеспечивают выполнение весьма важных функций:

- управление рулевыми поверхностями магистральных самолетов с
- использованием гидросилителей (бустеров);

- управление механизацией крыла (закрылки, предкрылки, интерцепторы, и т. п.);
- выпуск и уборку шасси, управление передним колесом при рулении, торможение колес при посадке, рулении и на стоянке;
- управление несущим и хвостовым винтом вертолета;
- открытие и закрытие створок грузовых люков.

Включение гидроагрегатов в контур управления воздушным судном требует от гидросистем высочайшей надежности. Решение этой проблемы достигается многократным резервированием гидросистем (2-х, 3-кратным).

Условия работы гидравлических жидкостей в гидросистемах характеризуются следующими параметрами: давление – 20 МПа (200 кгс/см²); диапазон рабочих температур от -50°С до +80...100°С; скорости скольжения трущихся пар составляет 20..25 м/с.

Для обеспечения надежной работы гидросистемы гидравлические жидкости должны удовлетворять следующим требованиям:

- пологая вязкостно–температурная характеристика при низкой температуре застывания;
- высокие смазывающие свойства;
- способность предохранять трущиеся детали от коррозии, а уплотнения от разрушения;
- стабильность при работе и хранении;
- малая пожароопасность и невзрываемость при ударных нагрузках;
- малая испаряемость и высокая температура кипения;
- экологическая безопасность и малая стоимость.

Жидкости для гидросистем делятся на три категории: минеральные; синтетические огнестойкие жидкости; смесевые гидравлические жидкости.

Минеральные жидкости изготавливаются на нефтяной основе. Для этого отбирают фракции нефти, выкипающие в интервале температур 200...300°С, и подвергают их последующей очистке физическими и химическими методами. При этом удаляются асфальто-смолистые вещества, гетероциклические, ароматические и нормально-парафиновые соединения, которые ухудшают термостабильность, низкотемпературные свойства, усиливают коррозию, вызывают набухание резин и уплотнительных материалов.

Долгие годы одной из наиболее распространенных в гражданской авиации РФ являлась минеральная гидравлическая жидкость **АМГ-10**, представляющая собой узкую нефтяную фракцию, выкипающую в интервале температур 210...300°С.

В целях улучшения вязкостных свойств фракции в неё вводится вязкостная присадка **ВИНИПОЛ**, которая представляет собой прозрачную вязкую массу, хорошо растворимую в углеводородах. Помимо повышения вязкости **ВИНИПОЛ** улучшает антикоррозийные и смазывающие свойства жидкости. Недостатком присадки **ВИНИПОЛ** является её легкая окисляемость при

повышенных температурах и в присутствии кислорода. Для уменьшения окисляемости присадки в жидкость вводится антиокислительная присадка ***α-нафтал (α-окси-нафталин)***. Гидравлическая жидкость АМГ-10 окрашивается в красный цвет, чтобы избежать ошибочной заправки.

Товарная жидкость АМГ-10 рекомендуется в качестве рабочей жидкости гидросистем самолетов с рабочим температурным режимом $-60^{\circ}\dots+100^{\circ}\text{C}$ в контакте с воздухом или техническим азотом.

При работе гидроагрегатов, работающих с ударной нагрузкой в условиях высоких температур и при контакте с кислородом воздуха, пары жидкости образуют смесь, самовоспламеняющуюся при температуре 92°C и давлении 220 атмосфер. Поэтому такие гидроагрегаты (гидроаккумуляторы, амортизаторы шасси) должны заполняться в газовых полостях только азотом.

АМГ-10 не коррозионноактивна и не токсична при обычных температурах, но вызывает набухание некоторых сортов резин и вымывает парафин из кожаных манжет, которым они пропитываются для придания коже большей эластичности.

В качестве уплотнительных материалов при работе с АМГ-10 используются маслостойкие уплотнения из нитрильных каучуков.

Присадка ***ВИНИПОЛ*** склонна к механической деструкции и поэтому необходим периодический контроль вязкости масла в процессе работы. Зарубежным аналогом жидкости АМГ-10 является жидкость AeroShell Fluid 41. В состоянии поставки вязкость жидкости АМГ-10 составляет 10сСт при температуре $+50^{\circ}\text{C}$.

В настоящее время весь парк авиационной техники гражданской авиации, эксплуатирующейся в России, переведен на гидрожидкости зарубежного производства AeroShell Fluid 41.

Область применения AeroShell Fluid 41 на основе минерального масла с композицией присадок различного назначения для гидравлических систем современных самолетов. Соответствует спецификации MIL-PRF-5606H, DEF STAN 91-48.

Синтетические гидравлические жидкости получают из продуктов химического взаимодействия различных веществ, отличающихся высокой химической и термической стабильностью и хорошими низкотемпературными свойствами.

Синтетические гидрожидкости выгодно отличаются от минеральных по комплексу эксплуатационных свойств, а также огнестойкости и большей пожаробезопасности.

К этому классу относятся жидкости ***НГЖ-5(У) и 7-50С-3***.

Аббревиатура НГЖ-5(У) расшифровывается как негорючая жидкость номер 5, улучшенная. Приготавливается на основе фосфорорганического эфира – дибутил-фенил-фосфата (ДБФФ). В основу вводится вязкостная присадка полиметилметаакрилат (ПММА) и стабилизатор, представляющий собой эпоксидную компоненту.



Рабочий диапазон применения жидкости: $-60...+150^{\circ}\text{C}$. Основа жидкости

– ДБФФ является сильнейшим растворителем для многих синтетических материалов. В связи с этим применение жидкости без предварительной подготовки всей гидросистемы под жидкость НГЖ-5(У) запрещена.

НГЖ-5У применяется на самолетах Ил-86, Ил-96, Ту-204 и др. современных ВС.

Освоение эксплуатации широкофюзеляжных самолетов Airbus и Boeing потребовали разработки новых негорючих гидрожидкостей, способных в качестве рабочей жидкости передавать большие усилия от органов управления к исполнительным механизмам авиалайнеров. В качестве негорючих гидрожидкостей четвертого поколения фирмами Шеврон и Монсанта были разработаны и внедрены продукты четвертого поколения НГЖ – Skydrol LD-4 (гидравлическая жидкость на основе эфиров фосфорной кислоты для гидравлической системы воздушных судов), Skydrol 500-B4 (гидравлическая жидкость на основе эфиров фосфорной кислоты для гидравлической системы воздушных судов) и HyJet-IV, HyJet-IVa и HyJet-IVa+ .

В последние годы созданы огнестойкие жидкости 5-го поколения, что позволило увеличить рабочую температуру в гидросистемах перспективных ЛА.

В настоящее время компаниями, производящими гидравлические жидкости нового поколения предложены перспективные жидкости HyJet-V и Skydrol -5. Эти гидрожидкости прошли всесторонние стендовые испытания в компаниях Airbus и Boeing в объемах стендовых и летных испытаний. Жидкости HyJet-V производства фирмы Exxon распространены для самолетов Boeing 707, 727, 737, 757, 767 и 777, для самолета А-380 компании Airbus, а также для других самолетов этой фирмы. Жидкость Skydrol -5 производится фирмой Solution.

Названные гидрожидкости имеют следующие характеристики:

- улучшенную термоокислительную стабильность, позволяющую эксплуатационные температуры до 190°C ;
- повышенное рабочее давление до 300 кг/см^2 ;
- увеличение эксплуатационного ресурса.

Гражданские воздушные суда РФ полностью перешли на использование описанных выше импортных гидравлических жидкостей.

Синтетическая жидкость 7-50С-3 представляет собой смесь полисилоксанов и органических диэфиров. Полисилоксаны (полиэфиры кремниевой кислоты) обладают пологой ВТХ, невысокой стабильностью к окислению и низкими смазочными свойствами. Поэтому с целью придания рабочей жидкости лучших эксплуатационных свойств полисилоксаны смешивают с органическими диэфирами, имеющими лучшие смазывающие свойства.

Рабочий диапазон применения жидкости: $-60...+175^{\circ}\text{C}$ в контакте с воздухом.

Кратковременно допускается температура $+200^{\circ}\text{C}$ в контакте только с азотом.

Жидкость 7-50С-3 обладает повышенным деструктивным воздействием на некоторые металлы и покрытия (медь, кадмиевые, фосфатные и др. покрытия), а также на уплотнительные резинотехнические изделия. Длительное

время жидкость 7-50С-3 применялась в гидросистеме сверхзвукового пассажирского самолета Ту-144 и ряда других летательных аппаратов. В настоящее время выпускается в ограниченных количествах. Зарубежным аналогом жидкости является Nycolube- 934.

Смесевая жидкость для гидросистем легких поршневых самолетов марки АМ/70 представляет собой смесь 70% глицерина, 20% этилового спирта и 10% дистиллированной воды. Обеспечивает работу амортизаторов шасси при температурах до -30°C . При повышенных температурах жидкость окисляется с образованием смолистых веществ и понижением вязкости. Ввиду наличия в составе жидкости АМ/70 воды и спиртов она обладает коррозионной активностью.

6. АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫЕ ЖИДКОСТИ

Основным средством, применяемым в мировой и отечественной практике для защиты от наземного обледенения самолетов, являются противообледенительные жидкости (ПОЖ). Они обеспечивают как удаление льда, снега, инея, так и предотвращение их образования на поверхности ВС.

В настоящее время в гражданской авиации РФ для проведения противообледенительных обработок используются жидкости "АРКТИ-КА", "АРКТИКА-200", "АРКТИКА ОС-2".

ПОЖ "АРКТИКА" представляет собой водный раствор этиленгликоля с добавлением 0,5% противокоррозийной присадки динатрий фосфат (Na_2HPO_4). Присадка предотвращает коррозию металлических частей самолета, не разрушает лакокрасочных покрытий и резинотехнических изделий. Температура застывания 37°C . Применяется до температур наружного воздуха -30°C в неразбавленном состоянии и подогретой до температур $80...90^{\circ}\text{C}$. Используется для удаления снежно-ледовых образований. Обладает малой предохраняющей способностью в условиях наземного обледенения: время защитного действия не более 3 - 5 мин.

ПОЖ "АРКТИКА-200" представляет собой водный раствор этиленгликоля, к которому добавлены противокоррозийная присадка динатрий фосфат в количестве 1,5%, поверхностно-активные вещества и загуститель. Обладает щелочной реакцией среды ($\text{pH} = 7,0...9,0$), имеет по сравнению с "АРКТИКОЙ" более высокую вязкость и плотность. Применяется до температуры наружного воздуха -45°C для удаления снежно-ледовых образований, предотвращения повторного обледенения. Обладает значительной предохраняющей способностью.

При удалении снежно-ледовых образований с поверхности самолета жидкость "АРКТИКА-200" подогревают до температуры $80...90^{\circ}\text{C}$. С целью экономии жидкости "АРКТИКА-200" разбавляют водой: 70 частей воды (по объему) на 100 частей жидкости при температуре наружного воздуха выше -30°C и 30 частей воды на 100 частей жидкости при температуре от -30°C до -50°C .

Допускается удаление снежно-ледовых отложений горячей водой с последующим немедленным опрыскиванием холодной неразбавленной жидкостью "АРКТИКА-200".



После нанесения жидкости "АРКТИКА" или "АРКТИКА-200" обшивка самолета становится скользкой, что необходимо учитывать при техническом обслуживании.

С 1994 г. введена в эксплуатацию жидкость "АРКТИКА ОС-2". Она представляет собой водный раствор этиленгликоля, содержит противокоррозийную присадку и структурообразователи, обеспечивающие вязкостные и пленкообразующие свойства жидкости. Кинематическая вязкость жидкости ОС-2 при температуре +20°C составляет 60...100мм²/с(сСт); температура застывания -56°C; температура кипения +108°C. После выкипания воды температура вспышки в открытом тигле составляет +128°C, воспламенения +380°C.

По сравнению с "АРКТИКОЙ" и "АРКТИКОЙ-200" жидкость ОС-2 имеет существенные преимущества:

- большее время защитного действия (до 40 мин.);
- меньшая кинематическая вязкость, облегчающая прокачку и распыл жидкости в условиях низких температур;
- «аэродинамическая пригодность», т.е. обеспечение эффекта сдувания жидкости с поверхности самолета при достижении определенной скорости при разбеге на этапе взлета.

Благодаря своим структурно-вязкостным свойствам жидкость ОС-2 при обработке самолета образует на его поверхности защитную пленку. Эта пленка в процессе разбега самолета подвергается сдвиговому воздействию от потока воздуха. При достижении скорости около 70 км/ч вязкость жидкости резко падает и она срывается с поверхности крыла и оперения, оставляя практически чистыми несущие и управляющие поверхности.

Обработка самолетов жидкостью ОС-2 производится с помощью передвижной установки типа "Элефант", в состав которой входят насосные и регулирующие устройства, не вызывающие сдвиговых напряжений в жидкости и снижения её вязкости.

Все три противообледенительные жидкости являются ядовитыми веществами: проникают через неповрежденную кожу и органы дыхания, поражая нервную систему, легкие, печень и почки. Приём внутрь 100..200 г данных жидкостей является смертельной дозой для человека. В аэродромных условиях особенно опасно вдыхание мелко распыленной жидкости-аэрозоля. Поэтому технический персонал, производящий обработку самолета, должен располагаться так, чтобы ветер относил от него распыленную жидкость, и, кроме того, иметь средства индивидуальной защиты дыхательных путей, лица и кожи рук.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинов А.А. Основы применения горюче-смазочных материалов в гражданской авиации: учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1987.
2. Рыбин Н.П. Авиационные смазочные материалы и спецжидкости. – М.: МИИГА, 1985.
3. Рыбин Н.П. Авиационные горюче-смазочные материалы. - М.: МИИГА, 1980.
4. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочник/ под ред. В.М.Школьников. – М.: Изд. центр «Техноформ», 1999.
5. Фадин В.П. Горюче-смазочные материалы: текст лекций. – Егорьевск: ЕАТК, 1997.
6. Химмотология в гражданской авиации: справочник/ В.А.Пискунов, В.Н. Зрелов, В.Т.Василенко и др. – М.: Транспорт, 1983.
7. Чулков П.В., Чулков И.П. Топлива и смазочные материалы: ассортимент, качество, применение, экономия, экология. – М.: Политехника, 1996.
8. Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., Галимов Ф.М. и др. Горюче- смазочные материалы для авиационных двигателей. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н.Туполева, 2002.
9. Дичаковский В.Б., Лабендик В.П., Мухин В.Н. Химмотология смазочных материалов и технических жидкостей для автомобилей европейского рынка: учебно-техническое издание. – Рига: ИТС, 2002.
10. Коняев Е.А., Немчиков М.Л. Авиационные горюче-смазочные материалы: учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2013.