

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

---

**Кафедра авиатопливообеспечения и ремонта летательных  
аппаратов**

**К.И. Грядунов, Т.М. Маслова**

**ХИММОТОЛОГИЯ И КОНТРОЛЬ  
КАЧЕСТВА ГСМ  
АВИАЦИОННЫЕ ТОПЛИВА**

**Учебно-методическое пособие  
по выполнению лабораторных работ**

*для студентов  
направления 25.03.01  
всех форм обучения*

Москва  
2019

ББК 052-082-32

Г-92

Рецензент:

*Самойленко В.М.* – д-р техн. наук, профессор

**Грядунов К.И.**

Г-92 Химмотология и контроль качества ГСМ. Авиационные топлива: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ./ К.И. Грядунов, Т.М. Маслова. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 56 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Химмотология и контроль качества ГСМ» по учебному плану для студентов направления 25.03.01 всех форм обучения.

В учебно-методическом пособии представлены лабораторные работы по определению основных показателей качества авиационных горюче-смазочных материалов в соответствии с требованиями современных нормативных документов и с применением необходимого оборудования. Преимущественно уделяется внимание показателям, оказывающим существенное влияние на эксплуатационные свойства авиационных ГСМ.

Основное внимание уделено авиатопливам для самолетов и вертолетов с газотурбинными двигателями.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 12.02.2019 г. и методического совета 04.02.2019 г.

*В авторской редакции*

Подписано в печать 12.03.2019 г.  
Формат 60x84/16 Печ. л. 3 Усл. печ. л.  
3,49 Заказ 426/090441 Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
*125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20*

Отпечатано ООО «МИР»  
394033, г. Воронеж, Ленинский пр-т 119 А, лит. Я, оф. 215

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2019

**Содержание**

Техника безопасности.....	4
Лабораторная работа № 1. ИСПАРЯЕМОСТЬ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ .....	5
Лабораторная работа № 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА С ВОДОЙ.....	12
Лабораторная работа № 3. ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ .....	16
Лабораторная работа № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ АВИАТОПЛИВ С ПОМОЩЬЮ ИКТ НА ПОЗ-Т .....	22
Лабораторная работа № 5. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ .....	26
Лабораторная работа № 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗАГРЯЗНЕНИЙ И КЛАССА ЧИСТОТЫ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ .....	31
Лабораторная работа № 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ТОПЛИВАХ ВЕСОВЫМ МЕТОДОМ....	36
Лабораторная работа № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОБЩЕЙ И МЕРКАПТАНОВОЙ СЕРЫ В АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВАХ.....	39
Лабораторная работа № 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВАХ .....	43
Лабораторная работа № 10. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ .....	47
Лабораторная работа № 11. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ НЕКОПТЯЩЕГО ПЛАМЕНИ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ.....	52

### Техника безопасности

Работа в лабораториях с ГСМ неизбежно связана с рядом опасных и вредных факторов. Лаборатории оборудованы специальными рабочими столами, шкафами и полками для ГСМ, реактивов, посуды, растворов. Для работы с ядовитыми летучими веществами имеются вытяжные шкафы. Лаборатории снабжены водопроводом и канализацией. Мебель и оборудование располагаются так, чтобы проходы между столами и выход из лаборатории были всегда свободными для обеспечения возможности быстрой эвакуации людей в экстренных случаях. В лабораториях имеются средства противопожарной безопасности, а также аптечка.

Для обеспечения безопасности необходимо соблюдать следующие **общие правила поведения в лаборатории**.

1. Лабораторные работы выполняются студентами во время, предусмотренное расписанием занятий.
2. Запрещается работать в лабораториях в неустановленное время без разрешения преподавателя.
3. В лабораториях запрещается работать в одиночку.
4. В лабораториях необходимо соблюдать чистоту, порядок и тишину.
5. Запрещается посещение студентов, работающих в лабораториях, посторонними лицами, а также отвлечение студентов посторонними работами и разговорами.
6. Запрещается находиться в лабораториях в любой верхней одежде.
7. Запрещается курить, принимать пищу, пить воду в лабораториях.
8. Запрещается проводить какие-либо опыты, не предусмотренные программой лабораторных работ, приносить свои реактивы, выносить реактивы из лабораторий.
9. К выполнению лабораторной работы можно приступать после изучения методики и правил работы с приборами.
10. На рабочем столе должны находиться только необходимые реактивы, оборудование, посуда и письменные принадлежности.
11. Поверхность стола должна быть чистой, сухой, свободной от посторонних предметов.
12. При выполнении лабораторных работ все операции необходимо выполнять над рабочим столом.
13. При работе с ГСМ необходимо надевать индивидуальные средства защиты для рук, включать вентиляцию.
14. Запрещается сливать ГСМ в канализацию.
15. После окончания работы следует вымыть посуду, отключить электроприборы, выключить воду, привести в порядок рабочее место и сдать его лаборанту (преподавателю).

## Лабораторная работа № 1. ИСПАРЯЕМОСТЬ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ

### Цель работы:

- изучить эксплуатационное свойство топлив – испаряемость;
- знать эксплуатационное значение показателей испаряемости авиационных топлив;
- уметь оценивать испаряемость авиационных топлив в соответствии с ГОСТ 2177-99.

### 1. Теоретическое введение

Топливо – это сложная смесь, состоящая из тысяч взаиморастворенных индивидуальных углеводородов, каждый из которых имеет определенные физические и химические свойства. В частности, температуру кипения. *Смесь углеводородов, выкипающих в определенном диапазоне температур, называется фракцией.* При определении фракционного состава, определяющего испаряемость топлив, топливо выкипает в интервале температур, который зависит от температур кипения каждого компонента. При постепенном нагревании испаряются сначала самые низкокипящие компоненты, а по мере увеличения температуры жидкой фазы начинают кипеть более тяжелые углеводороды. Постепенно температура жидкой фазы достигает максимума (конца кипения), когда испаряются самые высококипящие компоненты топлива, что соответствует концу его кипения.

*Испаряемость топлива есть переход его из жидкой фазы в газообразную.* От испаряемости зависит горючесть топлива, т. к. она определяет образование в камере сгорания двигателей топливовоздушной смеси. Испарение топлива в системе питания двигателя представляет собой процесс, состоящий из динамического испарения и кипения.

На испаряемость топлива в двигателе влияют такие *факторы* как углеводородный состав, температура среды, скрытая теплота парообразования, теплоемкость, величина поверхностного натяжения, скорость потока воздуха, вязкость, тонкость и полнота распыла топлива топливными форсунками и пр.

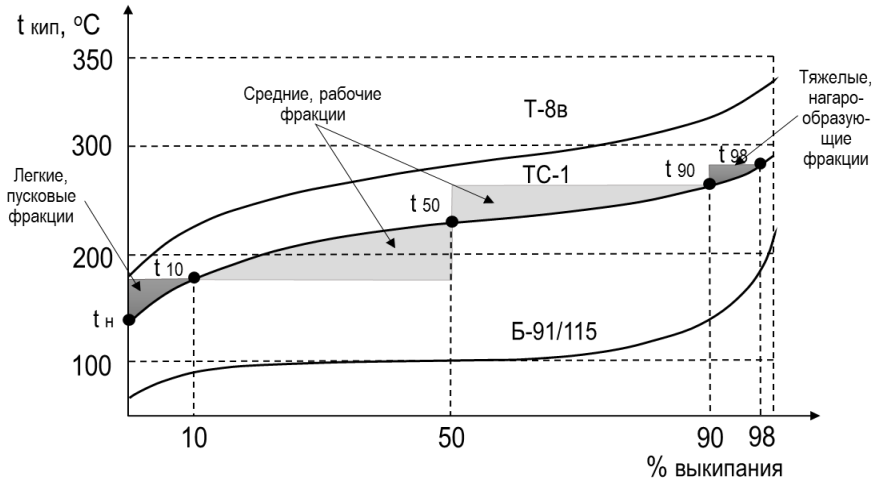
Полная и быстрая испаряемость топлива гарантирует легкий запуск и высокий КПД двигателя, низкий расход топлива.

Медленная испаряемость приводит к тому, что при запуске малолетучие высококипящие компоненты могут частично вылетать и сопла двигателя в несгоревшем или частично сгоревшем виде, увеличивая расход топлива, или попадать в капельножидком состоянии на стенки камеры сгорания и конструктивные элементы последующего воздушного тракта двигателя, затрудняя воспламенение и образуя впоследствии углеродистые отложения (*кокс*), значительно ухудшающие режимы работы конструктивных элементов двигателя вплоть до их разрушения. Также в результате низкой испаряемости происходит накопление топлива в камере сгорания, которое может самовоспламениться в любой момент, нарушая устойчивое горение и вызывая

нестабильную работу двигателя в целом. Перегретые стенки камер сгорания, покрытые коксом, могут приводить к несвоевременному воспламенению поступающего топлива.

В то же время, слишком быстрая испаряемость (низкая температура испарения основной массы топлива) может увеличить потери топлива при хранении, транспортировке и работе двигателя на таком топливе. Кроме того, повышается склонность топлива к *кавитации*, т. е. к образованию паровых пробок в топливной системе ВС, особенно при высотных полетах, что связано с понижением температуры кипения жидкости при снижении давления.

В лабораторных условиях испаряемость топлива оценивается по его фракционному составу. Результат *разгонки* (нагрева, испарения и конденсации) топлива обычно представляется в виде графика – кривой фракционной разгонки (рис. 1). Кривая фракционной разгонки позволяет оценить испаряемость топлив, их фракционный состав, содержащий компоненты с различным давлением насыщенных паров и температурными пределами выкипания, провести сравнительную оценку различных сортов и партий топлив.



**Рис. 1.** Кривые фракционных разгонок авиатоплив

Основные требования нормативной документации по испаряемости реактивных топлив приведены в таблице 1.

Следует отметить, что оценка испаряемости топлива не отражает действительного поведения топлива в двигателе, т. к. в двигателе происходит динамический процесс испарения, кипения и горения, а не кипения и конденсации, как это имеет место при разгонке топлива в лабораторных условиях. Однако ряд исследований и практика эксплуатации показали, что между некоторыми точками кривой фракционной разгонки и отдельными параметрами при работе двигателя имеются определенные зависимости.

Нормы по испаряемости реактивных топлив

Марка топлива	Температура начала кипения, °С	Температура выкипания 10 %, °С	Температура выкипания, 50 %, °С	Температура выкипания, 90 %, °С	Температура выкипания, 98 %, °С
ТС-1	150	175	225	270	280
РТ	155	175	225	270	280
Jet-A	-	205	-	300	-

Такими *характерными точками* на кривой фракционной разгонки являются:

- температура начала кипения  $t_n$ ;
- температура отгона 10 % топлива  $t_{10\%}$ ;
- температура отгона 50 % топлива  $t_{50\%}$ ;
- температура отгона 90 % топлива  $t_{90\%}$ ;
- температура отгона 98 % топлива  $t_{98\%}$ .

*Температура начала кипения*  $t_n$  характеризует высотность топлива, т. е. склонность его к кавитации при наборе высоты. Слишком низкая температура начала кипения приводит к образованию в топливной системе большого количества пузырьков воздуха. Особенно сильное их выделение и образование паровых пробок будет происходить или при повышении температуры топлива и окружающего воздуха, или при понижении давления, или при наличии обоих факторов.

Следовательно, высотными характеристиками реактивных топлив условно принято называть те свойства топлив, которые оказывают влияние на работу топливной системы самолета на большой высоте. Наиболее важными из них являются давление насыщенных паров, вскипание и испарение топлива на большой высоте, а также его летучесть при сильном разрежении атмосферного воздуха, чем и обуславливаются потери топлива из баков во время полета.

Температура начала кипения топлива в значительной мере определяет при какой высоте полета данный сорт топлива будет кавитировать, и как велика будет летучесть топлива, определяющая его потери из баков самолетов при выполнении высотных полетов.

С возникновением кавитации во время высотных полетов связаны два опасных явления: нарушение устойчивой работы топливной системы самолета; потеря топлива из баков из-за испарения.

Кавитация топлива сопровождается выделением паров топлива и воздуха и может происходить в топливных баках, топливопроводах и топливных насосах. Известно, что при прохождении топлива по топливопроводам местные сопротивления в топливной магистрали (стыки, резкие повороты, краны и т. д.) могут создать местные ускорения потока топлива, которые вызывают падение давления в этой локальной зоне. В результате топливо может закавитировать в топливной магистрали. Т. к. выделяющиеся при кавитации пары невозможно отвести из топливопровода, они будут скапливаться в топливной системе и

ухудшать поступление топлива в двигатель вплоть до полного прекращения подачи. Поэтому важно знать, при каком остаточном давлении начнется кавитация, т. е. знать границу, выше которой при полетах возможно нарушение работы топливной системы самолета.

При повышении температуры кавитация наступает на меньших высотах, т. е. при меньшем разрежении воздуха. Топливо ТС-1 при температуре +10°С кавитирует только на высоте 23 000 м, а при температуре +30 °С – на высоте 19 000 м.

Авиабензин Б-70 с давлением паров 200 мм.рт.ст. при температуре +10 °С закипает на высоте 14 000 м, а при температуре +30 °С – на высоте 9 600 м.

Т. к. температура оказывает сильное влияние на высотные характеристики топлива, то возникновение кавитации наиболее вероятно в летний период эксплуатации (особенно в районах с жарким климатом).

Наибольшая опасность возникновения кавитации и нарушения работы топливной системы самолета приходится на набор высоты и первую стадию горизонтального полета, пока топливо не охладилось. При длительном высотном полете топливо в баках самолета охлаждается, благодаря чему снижается давление его паров. Поэтому заправка самолетов охлажденным топливом может в значительной мере снизить кавитацию топлива в баках ВС.

*Температура выкипания 10 %  $t_{10\%}$*  топлива характеризует пусковые качества топлива. Чтобы запустить двигатель, необходимо к началу запуска иметь пусковой заряд – смесь воздуха с парами топлива в отношении не более 25:1, что соответствует нижнему пределу воспламенения керосинов. Создание такого заряда, особенно при низких температурах, может быть достигнуто при наличии в топливе 10 %-ой фракции, выкипающей при возможно более низкой температуре. Чем ниже температура выкипания 10 %-ной фракции топлива, тем легче запустить двигатель при низких температурах окружающего воздуха. Для авиационного керосина величина температуры выкипания 10 %-ной фракции должна находиться в определенных пределах, причем минимум нижнего предела должен определяться возможностью легкого запуска двигателя на данном керосине, а максимум верхнего предела должен гарантировать нормальную работу двигателя без образования паровоздушных пузырьков.

*Температура выкипания 50 %  $t_{50\%}$*  керосина характеризует скорость прогрева, устойчивость работы на малых оборотах и приемистость двигателя.

Установлено, что быстрый прогрев авиационного двигателя до момента перехода на полный газ возможен, если 50 %-ая фракция находится в пределах не выше указанного в нормативных документах на топливо. Чем выше эта температура, тем хуже испаряются рабочие фракции и тем большее время прогрева двигателя требуется. **Приемистость** – время перехода с режима малого газа на взлетный режим – и устойчивость работы двигателя тем лучше, чем меньше температура данной нормированной точки на кривой фракционной разгонки.



Температуры выкипания 90 % и 98 %  $t_{90\%}$  и  $t_{98\%}$  керосина характеризуют полноту сгорания топлива в двигателе и его экологичность. Если эти температуры слишком высокие, то не будет обеспечена полнота испарения керосина и, как следствие, полнота его сгорания. Это вызывает снижение КПД и тяги двигателя вследствие ухудшения качества смеси, поступающей в камеру сгорания, увеличивается удельный расход топлива, уменьшается дальность полета самолета. Одновременно усиливается дымление двигателя и образование нагаров на конструкционных элементах двигателя, что снижает ресурс работы двигателя в целом.

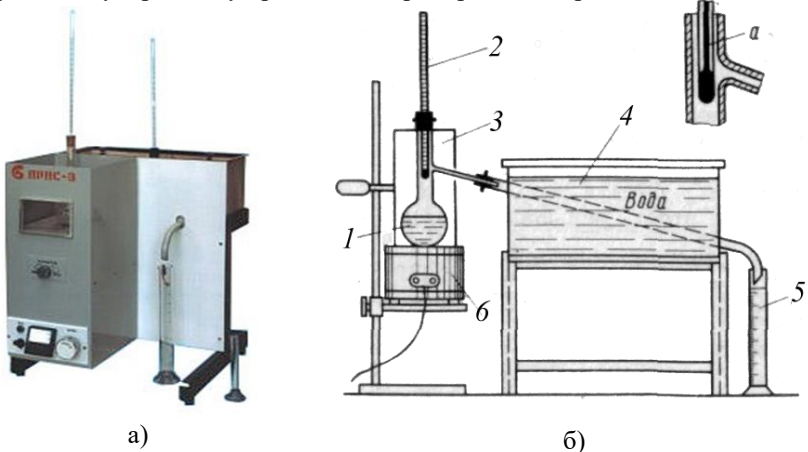
Современные авиационные двигатели требуют, чтобы применяемые керосины имели  $t_{90\%}$  не выше 270 °С, а  $t_{98\%}$  не выше 315 °С, что соответствует характеристикам топлива Jet-A. У керосинов ТС-1 и РТ данная характеристика значительно лучше.

## 2. Экспериментальная часть

Сущность метода заключается в перегонке 100 мл испытуемого образца топлива при условиях, соответствующих природе продукта, и проведении постоянных наблюдений за показаниями термометра и объемами конденсата.

Перед испытанием авиатопливо обезвоживают. При повышенном содержании воды в топливе его обезвоживают предварительным отстаиванием с последующим фильтрованием.

Фракционную разгонку проводят на приборе АРНС (рис. 2).



**Рис. 2.** Общий вид а) и составные части прибора АРНС-Э б):

1 – колба с образцом топлива; 2 – термометр для измерения температуры паров топлива, уходящих в холодильник, с интервалом измеряемых температур до 360 °С и точностью измерения температуры до 1 °С; 3 – кожух; 4 – холодильник-конденсатор паров топлива; 5 – мерный цилиндр на 100 мл; 6 – электронагреватель.

### Порядок проведения испытания

В сухой и чистый цилиндр наливают 100 мл подготовленного к испытанию топлива. После этого переливают пробу топлива из цилиндра в колбу прибора так, чтобы топливо не попало в отводную трубку колбы. Колбу плотно закрывают пробкой с закрепленным в ней термометром так, чтобы верхний конец ртутного шарика находился на уровне нижнего края отводной трубки колбы как показано на рис. 2.

После этого колбу устанавливают на электронагреватель и укрепляют отводную трубку колбы пробкой в передней части холодильника-конденсатора. Под выходным концом трубки холодильника устанавливают мерный цилиндр так, чтобы нижний конец трубки был ниже верхнего обреза цилиндра. Собрав прибор, тумблером включают электрообогрев и устанавливают необходимую величину напряжения ЛАТРа. Наблюдают в смотровое окно за процессом закипания топлива. При чрезмерной интенсификации кипения паров регулируют величину нагрева ручкой на передней панели прибора. Пары топлива накапливаются над поверхностью жидкости и поднимаются вверх по горловине колбы. Дойдя до отводной трубки, они направляются в холодильник-конденсатор, заполненный проточной водой, конденсируются и вытекают из правой части трубки в мерный цилиндр. При падении первой капли конденсированного топлива с выходной трубки холодильника фиксируют температуру на термометре. Данная температура считается температурой начала кипения (перегонки).

Далее разгонку ведут таким образом, чтобы падение капель составляло 4-6 шт. в секунду. Скорость разгонки регулируют ручкой ЛАТРа. При достижении уровня топлива в мерном цилиндре 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 и 98 мл отмечают температуру, соответствующую этим объемам в цилиндре, по термометру.

Все отсчеты при перегонке ведут с погрешностью не более 0,5 мл и 1 °С.

Температура, отмеченная в момент испарения последней капли жидкости со дна колбы во время перегонки, является *температурой конца перегонки*. Капли или пленка жидкости на стенке колбы или термометра не учитываются.

По полученным результатам на диаграмме, полученной от преподавателя, строят кривую фракционной разгонки опытных образцов топлив, отмечают показатели испаряемости, сравнивают образцы друг с другом и с нормативными значениями.

Делают заключение о марке испытуемого образца топлива и развернутый вывод о пригодности данных образцов топлива к применению.

### 3. Контрольные вопросы

1. Что такое испаряемость? Метод оценки испаряемости.
2. Какими основными показателями характеризуется испаряемость АТ?
3. Дайте характеристику эксплуатационных значений характерных точек на кривой фракционной разгонки.

4. Рассмотрите влияние испаряемости на высоту полета.
5. Рассмотрите влияние испаряемости на условия холодного запуска двигателя.
6. Рассмотрите влияние испаряемости на приемистость двигателя.
7. Рассмотрите влияние испаряемости на условия нагарообразования и полноты сгорания топлива в двигателе.
8. Рассмотрите отрицательное и положительное влияние повышенной испаряемости на работу топливных систем самолета и двигателя.
9. Что такое кавитация? Опишите взаимосвязь между испаряемостью и кавитацией топлив.
10. Расскажите порядок проведения эксперимента по оценке испаряемости АТ в соответствии с ГОСТ 2177-99.
11. Опишите прибор для проведения эксперимента по оценке испаряемости авиационных топлив.

## Лабораторная работа № 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА С ВОДОЙ

### Цель работы:

- изучить способы оценки чистоты авиационных топлив;
- знать влияние загрязненности АТ на эксплуатацию ВС и АД;
- уметь определять чистоту авиационных топлив по ГОСТ 27154-86.

### 1. Теоретическое введение

Под **чистой авиационных топлив** понимают степень их загрязненности механическими примесями и водой.

Существуют количественные и качественные (экспресс) методы оценки чистоты авиационных топлив. К количественным методам оценки загрязненности относятся весовой, гранулометрический, Карла Фишера и др., к качественным – визуальные методы, методы с использованием индикаторов качества топлива (ИКТ) и метод испытания на взаимодействие с водой. Последнему указанному методу посвящена данная работа, остальные будут изучены на соответствующих лабораторных работах.

Метод испытания на взаимодействие с водой характеризует присутствие в топливах загрязнений и ПАВ.

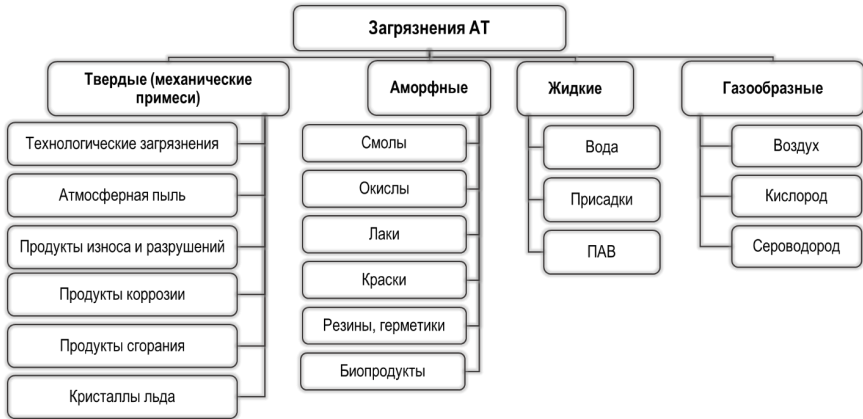
**Загрязнения (механические примеси)** – микрочастицы минеральной и органической природы, появившиеся в топливе при производстве, транспортировке, прокачке, хранении, применении по прямому назначению и пр. **ПАВ** – различные химические соединения как специально введенные в топливо для улучшения эксплуатационных свойств, так и попавшие в топливо извне в качестве загрязнений.

Механические примеси, присутствующие в топливах, имеют различную природу и могут быть классифицированы в соответствии с рис. 1.

*Влияние загрязнений на эксплуатацию авиационной техники* неодинаково, но в подавляющем большинстве случаев является негативным. Повышенное содержание механических примесей может приводить к забивке ФТО двигателей, повышенному изнашиванию узлов и агрегатов двигателей, заклиниванию и залипанию (зависанию) золотниковых пар, уменьшению проходных сечений топливопроводов и ТМР, повышению коррозии конструкционных материалов, разрушению резин, герметиков и мн. др.

*Влияние ПАВ*, находящихся в топливе, также может проявиться различным образом, однако эти вещества, как правило, ухудшают такие эксплуатационные свойства как вязкость и прокачиваемость. Они способствуют росту частиц загрязнений, адсорбируются на фильтрующих поверхностях и ускоряют их блокирование механическими примесями и мазеобразными отложениями, затрудняют удаление воды из топлива, т. к. в их присутствии повышается устойчивость водных эмульсий и пр. Поэтому содержание в топливе необходимых ПАВ должно быть оптимальным, достаточным для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств, но не способствовать значительному

эмульгированию воды и дезактивации водоотделяющих поверхностей фильтров-сепараторов, а содержание прочих ПАВ должно исключаться.



**Рис. 1.** Классификация загрязнений, присутствующих в АТ

Вследствие химических, биологических и коррозионных процессов, а также из-за постоянного контакта топлива с атмосферой в нем накапливаются механические загрязнения.

При подготовке топлива к заправке в ВС необходимо очистить топливо до содержания механических примесей не более 2 г/т, для чего осуществляется его многоступенчатая очистка: фильтрация и отстаивание. Содержание механических примесей контролируется на всех этапах авиатопливообеспечения воздушных судов.

Актуальность простого метода оценки чистоты авиатоплива по опыту на взаимодействие с водой возросла с момента увеличения случаев их загрязнения биологическими продуктами и остатками биодизелей, что значительно участило случаи забивки ФТО авиационных двигателей данными продуктами.

*Сущность метода* заключается в контактировании образца топлива с дистиллированной водой (или буферным раствором фосфата) с последующей оценкой состояния фаз (топливо – вода) и поверхности их раздела.

## 2. Экспериментальная часть

Тщательно промывают стеклянную посуду, используемую при испытании. Не допускается применять поверхностно-активные вещества. Удаляют следы нефтепродукта со стенок цилиндра, пробки и пипетки н-гептаном или нефтяным растворителем с последующей промывкой ацетоном и водой. Цилиндр, пробку и пипетку погружают приблизительно на 30 мин в хромовую смесь, затем смесь осторожно сливают. Посуду последовательно ополаскивают водой, дистиллированной водой и дают жидкости стечь.

При применении буферного раствора – раствора фосфата (рН 7), его готовят следующим образом: в мерной колбе в дистиллированной воде растворяют 1,5 г

двузамещенного фосфорнокислого калия 3-водного ( $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ ) и 0,47 г однозамещенного фосфорнокислого калия ( $KH_2PO_4$ ) посуду дополнительно ополаскивают раствором фосфата и дают жидкости стечь. Если на стенках цилиндра остаются капли, его вновь погружают в хромовую смесь на 30 мин и повторяют операцию с промывкой водой или буферным раствором.

Буферный раствор фосфата используют при арбитражном анализе.

Полученные пробы топлива выдерживают при температуре  $(20 \pm 3)^\circ C$  не менее 30 мин и перемешивают в течение 3 мин.

В тщательно подготовленный цилиндр при температуре  $(20 \pm 3)^\circ C$  с помощью пипетки, избегая разбрызгивания, наливают  $20\text{ см}^3$  дистиллированной воды или буферного раствора фосфата (измерение проводят по нижнему мениску с погрешностью не более  $0,5\text{ см}^3$ ), затем наливают  $80\text{ см}^3$  испытуемого топлива и закрывают цилиндр пробкой.

Цилиндр встряхивают в течение 2 мин (по секундомеру), производя 2-3 взмаха в секунду в горизонтальном направлении с амплитудой 10-25 см. При встряхивании не допускается вращательное движение, которое при образовании эмульсий приводит к ее разрушению.

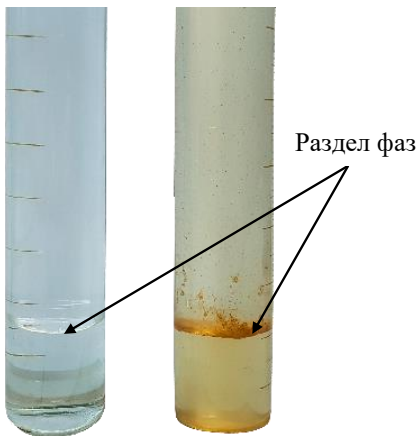
После встряхивания цилиндр с закрытой пробкой немедленно ставят на поверхность, не подвергающуюся ощутимой вибрации, и дают содержимому отстояться.

После 5 мин отстоя, не перемещая цилиндр, определяют визуально состояние поверхности раздела (рис. 2).

То же делают после 30 мин отстоя при рассеянном свете на белом фоне.

Результаты взаимодействия топлива с водой оценивают по состоянию поверхности раздела и разделенных фаз в баллах в соответствии с табл. 1.

По полученным результатам делают заключение о пригодности образцов топлив к применению.



**Рис. 2.** Определение раздела фаз (слева – чистое топлива, справа – загрязненное)

Оценка состояния раздела фаз в баллах

Состояние поверхности раздела	Состояние разделенных фаз	Балл
Поверхность раздела чистая, прозрачная. Допускается наличие налета, прозрачной пленки, мелких прозрачных пузырьков, неполностью покрывающих поверхность раздела	Четкое разделение фаз. Отсутствие эмульсии внутри каждого слоя. Допускается наличие мути, не заметной на белом фоне	1
Плотная непрозрачная пленка или сплошной слой пены	Нечеткое разделение фаз. Наличие эмульсии внутри каждого слоя, заметной на белом фоне	2

### 3. Контрольные вопросы

1. Назовите способы оценки чистоты авиационных топлив.
2. Что такое чистота топлива?
3. В чем состоит суть определения чистоты топлив по испытанию на взаимодействие с водой.
4. Опишите методику определения загрязненности топлива по ГОСТ 27154-86.
5. Назовите виды механических загрязнений, присутствующих в авиационных топливах.
6. Назовите возможные негативные последствия содержания механических примесей и ПАВ в топливах.
7. Назовите применяемые способы очистки авиационных топлив от загрязнений.
8. Что такое чистота авиационных топлив и какие требования к ней предъявляются?
9. Дайте определение механическим примесям и ПАВ.

## Лабораторная работа № 3. ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ

### Цель работы:

- изучить эксплуатационное свойство топлив – стабильность;
- знать влияние стабильности топлив на работу топливных систем воздушных судов и авиационных двигателей;
- уметь определять термическую стабильность топлив в статических условиях по ГОСТ 11802-88.

### 1. Теоретическое введение

Под **стабильностью топлив** понимают их способность сохранять неизменными свои физико-химические свойства и состав в процессе транспортировки, хранения и прокачки по топливным системам летательного аппарата и двигателя.

Причиной изменения свойств топлив является их окисление кислородом воздуха (автоокисление), в результате которого в них могут образовываться различные продукты окисления (перекиси, спирты, смолистые соединения) и др.

*Интенсивность автоокисления зависит* от химического и фракционного состава топлив, температуры, наличия в надтопливном пространстве и в самом топливе кислорода и катализаторов окисления – металлов, входящих в состав конструкционных материалов элементов топливных систем.

Состав образующихся нерастворимых продуктов окислительного уплотнения сложен, но результат этого процесса приводит к тому, что топливо из товарного продукта превращается в смесь нефтяных отходов, непригодных к применению на ВС.

Установлено, что скорость смолообразования при нормальных температурах пропорционально содержанию углеводов, содержащих в структуре своей молекулы двойные связи: непредельные углеводороды и образующиеся в процессе их окисления высокомолекулярные полимеры, отрицательно сказывающиеся на эксплуатационные свойства топлив.

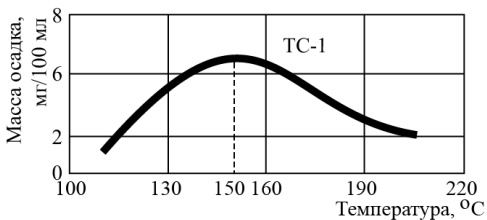
Углеводороды, составляющие топлива, в газовой и жидкой фазах окисляются в зависимости от содержания кислорода в зоне реакции. Чем оно выше, тем больше образуется продуктов окисления. Для снижения этого отрицательного эффекта возможно применение операции азотирования топлива перед заправкой. Она заключается в продувке через объем топлива в заправочных резервуарах газообразного азота, вытесняющего растворенный в нем кислород. Азот предотвращает процессы окисления топлива. Этот же принцип используется при установке систем азотирования надтопливного пространства в систему наддува баков ВС и в резервуары хранения ТЗК. Также для повышения термостабильности авиационных топлив применяются антиокислительные присадки.

Увеличение температуры способствует увеличению скорости и глубины окисления топлив. Максимальная температура жидкофазного окисления топлив



ТС-1 и РТ составляет 150 °С, что соответствует началу кипения на кривой фракционной разгонки. На рис. 1 показаны характерные температуры, при которых образуется максимальное количество осадка в процессе окисления для топлива ТС-1.

Из приведенных данных видно, что чем выше температура начала кипения топлива, тем при более высокой температуре образуется максимальное количество осадка при его окислении. У топлива ТС-1 температура начала кипения составляет 150 °С. Это определяет наличие на кривой величины осадкообразования (рис. 1) максимума и объясняется тем, что после начала кипения топлива происходит интенсивный процесс парообразования, при котором из жидкой фазы интенсивно испаряется и окислитель – кислород, что заметно ослабляет скорость окисления в жидкой фазе и, соответственно, накопление осадка.



**Рис. 1.** Влияние температуры на образование ВТО в авиатопливе ТС-1

*Влияние конструкционных материалов на скорость окисления и стабильность топлива определяется их каталитической активностью процессов полимеризации и конденсации с образованием нерастворимых веществ, особенно при повышении температуры.*

По скорости окисления металлы можно расположить в следующем порядке по мере убывания каталитических свойств:  $Pb > Cu > Sn > Cr > Fe > Al$ . Сплавы: нержавеющие стали > бронзы > латуни > дюралюминий. Некоторые металлы ингибируют (замедляют) процессы окисления:  $V > Mo > Mg > W > Ni$ .

Катализ окисления углеводородов проявляется при контакте топлив с солями металлов, их ионами и самими металлами. Термоокислительная стабильность топлив снижается в присутствии смолистых и сернистых соединений и, особенно, меркаптанов. В процессе производства топлив при использовании операции гидроочистки (обработки топлив газообразным водородом при высоких температурах и давлениях) из топливных фракций почти полностью удаляются гетероорганические и непредельные соединения, а меркаптаны полностью. Это позволяет гидроочищенным маркам топлив (РТ; Т-8в; Т-6) успешно противостоять окислению, т. е. делает их более термостабильными вплоть до температур 300 – 350 °С.

*Отрицательное влияние наличия в топливе ВТО заключается в следующем: забиваются ФТО двигателей, топливные форсунки, происходит заклинивание или залипание золотниковых пар, ухудшается работа ТМР вследствие налипания ВТО на стенках его трубопроводов, наличие ВТО способствует укрупнению частиц загрязнений и пр.*

### Методы оценки стабильности топлив

Стабильность топлива оценивают по следующим *показателям*: массовая концентрация осадка, фактических смол в статических условиях; перепад давления на фильтре, цвет и толщина ВТО на контрольной трубке в динамических условиях.

**Осадок в топливах** представляет собой твердый остаток, образовавшийся в топливе после его выдерживания при 150 °С в течение 4 ч в присутствии катализатора – зачищенной до блеска медной пластинки. Размерность – мг/100 мл.

**Фактические смолы** топлив представляют собой твердый или полужидкий остаток после полного выпаривания 100 мл топлива. Размерность – мг/100 мл.

По своей природе все высокотемпературные отложения (ВТО) – это вещества изначально растворимые в топливе. Но их последующее окисление приводит к образованию и выделению из топлив в виде осадка нерастворимых продуктов.

Массовая концентрация фактических смол в различных марках топлив прямой перегонки сернистых дистиллятов должно быть не более 5 мг/100 мл, а для малосернистых и гидроочищенных топлив, не более 4 мг/100 мл. Средние количества нерастворимых осадков приведены в табл. 1.

Массовая концентрация осадка для топлив ТС-1 не должна превышать 18 мг/100 мл; для РТ не должна превышать 6 мг/100 мл.

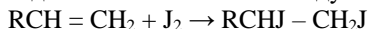
Таблица 1

Средние концентрации нерастворимых осадков

Топливо	Массовая концентрация, мг/100 мл	
	Норма	Фактически
ТС-1	≤ 18	4 - 21
РТ	≤ 6	3 - 5,5
Т-8в	≤ 6	0,6 - 3

Косвенно стабильность топлива оценивается также по **йодному числу** (ЙЧ), *т. е. количеству грамм йода, присоединившихся к молекулам непредельных углеводородов с двойными и тройными связями в процессе реакции их разрыва, входящих в состав 100 мл топлив*. ЙЧ оценивается в г J<sub>2</sub>/100 мл. Реакция присоединения протекает при комнатной температуре в течении 30 мин.

Реакция присоединения описывается следующим образом:



Значение ЙЧ оценивается по массе вступившего в реакцию йода титрованием топлива с навеской йода. Для топлив прямой перегонки сернистых нефтей ЙЧ не должно превышать 3,5 г J<sub>2</sub>/100 мл, для малосернистых и гидроочищенных топлив – не более 2 и 0,5 соответственно.

*В динамических условиях* термическая стабильность топлива оценивается по методу JFTOT по перепаду давления на контрольном фильтре и цвету высокотемпературных отложений на контрольном образце фрагмента

трубопровода. Также в последнее время вводится показатель толщины ВТО на контрольной трубке. При испытании по данному методу имитируется работа топливных систем ВС. Общий вид прибора приведен на рис. 2.



Рис. 2. Прибор JFTOT

Прибор JFTOT используется для анализа термической стабильности реактивного топлива в динамических условиях и рекомендован комиссией ASTM для анализа по методу D 3241 и ГОСТ 17751-79. Установка является обязательной при выпуске реактивного топлива Jet A-1, JP-8, Джет А-1, а также для отечественных топлив ТС-1 и РТ.

Также для отечественных реактивных топлив для оценки термической стабильности применяется метод в *статических условиях*. Оценка осуществляется по количеству образовавшегося нерастворимого осадка при выдерживании топлива при температуре 150 °С в течении 4 часов в контакте с воздухом в надтопливном пространстве и катализатором (медной пластинкой) на аппарате ТСРТ по ГОСТ 9144-79 и ГОСТ 11802-88 (рис. 3). Преимущество данного метода состоит в простоте и дешевизне оборудования, а также в большей объективности результатов измерения, если принять во внимание, что наибольшее смолоотложение в топливных системах ВС будет наблюдаться в момент останова двигателя, т. е. когда топливо с высокой температурой перестает циркулировать по топливной системе.

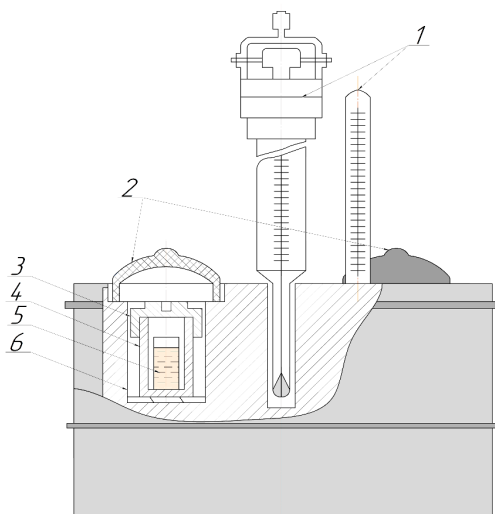


Рис. 3. Прибор ТСРТ-2м

## 2. Экспериментальная часть

Испытуемое топливо в объеме 50 мл отмеривают мерным цилиндром и после фильтрации переносят в стеклянный стакан (5), входящий в комплект прибора, изображенного на рис. 4.

Прибор подключают к сети, установив заданную температуру нагрева контактного термометра (1) в 150 °С. После достижения данной температуры стеклянный стакан помещают в герметичный сосуд из нержавеющей стали (бомбу) (4) и опускают в него медную пластинку, предварительно зачищенную до блеска наждачной бумагой и пастой ГОИ. Бомбу плотно закрывают навинчивающейся крышкой (3) для обеспечения герметичности. С помощью приспособления, входящего в состав прибора в виде металлического стержня с резьбой на концевой части устанавливают закрытую бомбу в гнездо прибора (6) и закрывают гнездо крышкой (2). Засекают время испытания – 1 час.



**Рис. 4.** Прибор для определения стабильности реактивных топлив:

1 – термометр; 2 – крышка гнезда бомбы; 3 – крышка бомбы; 4 – бомба; 5 – стакан с топливом и медной пластинкой; 6 – гнездо для установки металлической бомбы.

За 10 минут до окончания испытания в сушильный шкаф, нагретый до 105 °С кладут безольный фильтр на 5 минут для просушки от влаги. После просушки вынимают фильтр щипцами, дают остыть и взвешивают на электронных аналитических весах с точностью до 0,0002 г. Результат взвешивания записывают в отчет.

Вынимают бомбу, устанавливают ее в специальный держатель на лабораторном столе и аккуратно отвинчивают крышку. Дав бомбе остыть до комнатной температуры, щипцами извлекают стакан с топливом, переливают его в делительную воронку. Просушенный фильтр складывают в виде воронки, помещают в стеклянную воронку, расположенную под делительной воронкой, и медленно пропускают через него пробу топлива.

Скорость фильтрации должна быть такой, чтобы анализируемое топливо полностью профильтровалось. По окончании фильтрации, фильтровальную бумагу помещают в нагретый до 105 °С воздушный термостат для просушки. После этого щипцами вынимают сухой фильтр, охлаждают его и взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0002 г.

Результат взвешивания вносят в протокол испытаний.

Рассчитывают массовую концентрацию осадка в испытуемом образце топлива по формуле:

$$C = (m_2 - m_1) \cdot 2 \cdot 4,$$

где  $C$  – концентрация фактических смол в мг/100 мл;

$m_1$  – масса фильтра до фильтрования пробы, г;

$m_2$  – масса фильтра после фильтрования пробы, г;

2 – коэффициент приведения массы топлива к 100 мл;

4 – коэффициент пересчета массы осадка к стандартной длительности испытания – 4 часа.

По результатам испытания делают вывод о кондиционности испытанного топлива.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Что понимается под термином стабильность авиационных топлив?
2. Какие факторы и как влияют на стабильность авиационных топлив?
3. Какими методами оценивается стабильность авиационных топлив?
4. Какие методы испытаний применяют для определения концентрации ВТО? Их преимущества и недостатки.
5. Опишите методику определения стабильности топлив по ГОСТ 11808-88.
6. Опишите прибор для определения ВТО в АТ по ГОСТ 11808-88.
7. Что такое фактические смолы?
8. Для чего в образец топлива при проведении испытаний по определению фактических смол в статических условиях помещают медную пластинку?
9. Назовите способы повышения стабильности топлив в эксплуатации.
10. Назовите отрицательное влияние ВТО на работу топливных систем ВС.

## Лабораторная работа № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ АВИАТОПЛИВ С ПОМОЩЬЮ ИКТ НА ПОЗ-Т

### Цель работы:

- изучить способы оценки чистоты авиационных топлив;
- знать влияние загрязненности АТ на эксплуатацию ВС и АД;
- уметь определять загрязненность авиационных топлив в соответствии с ГОСТ 10577-78.

### 1. Теоретическое введение

Теоретическое введение, касающееся чистоты авиационных топлив, методов ее оценки и влияния различных видов загрязнений на работу узлов и агрегатов топливных систем ВС и АД, рассмотрено в лабораторной работе № 2. Взаимодействие авиатоплива с водой.

Данная лабораторная работа посвящена изучению экспресс метода качественной оценки чистоты авиационного топлива с помощью *индикатора качества топлива* (ИКТ) при помощи ПОЗ-Т (*прибор/приспособление определения загрязненности топлива*).

*ИКТ к ПОЗ-Т предназначен для определения уровня загрязненности авиационных топлив с присадками и без них механическими примесями и свободной (эмульсионной) водой.* Метод применяется в основном при проведении аэродромного контроля качества авиационных топлив.

#### Взаимодействие авиационных топлив с водой

Все нефтепродукты обладают *обратимой гигроскопичностью*, т. е. способностью растворять в себе воду из окружающего воздуха и выделять ее при снижении температуры.

*Растворимость воды в топливах зависит* от их углеводородного состава, плотности, температуры окружающего воздуха и топлива, влажности воздуха, внешнего давления и пр. и описывается формулой Генри:

$$g_{H_2O} = g_0 \psi_0 \frac{p}{p_0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n,$$

где:  $g_0$  - растворимость воды в авиатопливе при  $p_0=760$  мм рт. ст. и  $T_0=293$  К;

$\psi_0=1,0$ ;

$n = 11$  – показатель степени.

Выделяют *7 фазовых состояний воды* в топливной системе ВС и определяют следующие взаимные переходы фаз (рис. 1). И 3 фазовые состояния воды в самом топливе: растворенная вода, свободная (эмульсионная, микрокапли или отстойная) и кристаллы льда. Растворимость воды в топливах в зависимости от температуры представлена на рис. 2.

Выделение воды из топлива в виде свободной фазы может приводить к появлению свободных микрокапель воды или к образованию смеси этих микрокапель (с высокой концентрацией) с самим топливом или ПАВ – т. е. к образованию *эмульсионной воды*. В определенных условиях вода в топливной

системе ВС может превращаться в пар с последующей конденсацией или без нее, кристаллизоваться.



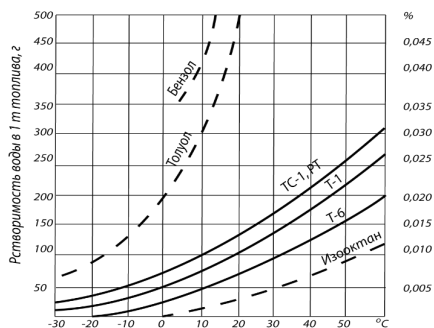
**Рис. 1.** Фазовые переходы воды в топливной системе ВС

Растворенная вода является безопасной для эксплуатации ВС, однако другие состояния воды приводят к нарушению работы узлов и агрегатов топливных систем. *Негативные последствия* наличия воды в топливе выражаются в обмерзании сеток ФТО двигателей вплоть до прекращения подачи топлива в двигатель, предохранительных сеток перекачивающих насосов и самих перекачивающих насосов, приводя к их разрушению и прекращению перекачки топлива; забивке дренажных систем; обмерзанию клапанов; изменении показаний датчиков-уровнемеров; повышении коррозионной активности топлив; разрушении соединений элементов топливных систем вследствие их многократного замерзания-отмерзания и пр. Стоит отметить, что прочие загрязнения топливных систем значительно снижают температуру замерзания микрокапель воды.

В связи с указанным содержание воды в топливах ограничивается (по действующим нормам – не более  $30 \text{ г}_{\text{воды}}/\text{г}_{\text{топлива}}$ ).

Существуют следующие *методы оценки наличия или содержания воды* в АТ: визуальный, при помощи ИКТ ПОЗ-Т, при помощи детекторов воды и определения содержания воды в топливе по методу Карла Фишера (ГОСТ 56340-2015).

Визуально проверку содержания механических примесей и воды в авиационных топливах проводят следующим образом. Перед испытанием исследуемое топливо тщательно перемешивают встряхиванием и быстро наливают в чистый цилиндр из бесцветного стекла диаметром 40 – 55 мм. Рассматривать пробу необходимо через 1 – 2 мин после помещения ее в цилиндр, когда поднимутся пузырьки воздуха. Желательно перед испытанием придать АТ в цилиндре вращательное движение, при этом механические примеси будут увлекаться со дна цилиндра. Свободная вода в АТ легко обнаруживается визуально, так как она практически не смешивается с нефтепродуктами и располагается в нижнем слое топлива в виде капель. В АТ при визуальном



**Рис. 2.** Растворимость воды в 1 т топлив

рассмотрении его в проходящем свете не должно наблюдаться взвешенных или осевших на дно стеклянного цилиндра посторонних примесей, в том числе и капель воды.

Внешний вид и конструктивная схема ПОЗ-Т приведены на рис. 3-4.

ИКТ изготовлен из двух прямоугольных отрезков аналитической ленты НЭЛ-4, сложенных в два слоя и скрепленных между собой по одному краю. Первый слой со стороны входа топлива – белый, пропитан солью трехвалентного железа, второй слой – желтый, пропитан красной и желтой кровяными солями. Первый (белый) слой индикаторного элемента должен быть обращен в сторону подвижной части датчика – служит для определения содержания в топливе механических примесей, второй слой (желтый) – для определения содержания свободной воды. Срок годности индикатора загрязненности топлива с момента выпуска 2 года.

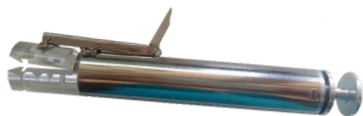


Рис. 3. Внешний вид ПОЗ-Т

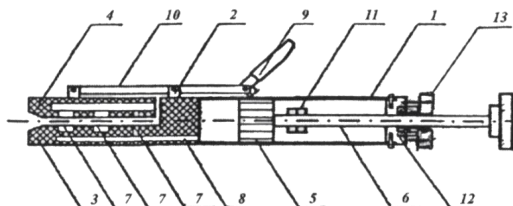


Рис. 4. Конструктивная схема ПОЗ-Т

1 - дозирующая часть, 2 - механизм открытия-закрытия датчика, 3 - неподвижная часть датчика (основание), 4 - подвижная часть датчика (крышка); 5 – поршень; 6 – шток; 7 - калиброванные отверстия; 8 - топливный канал; 9 - хвостовик с кулачком; 10 - рычаг механизма открытия- закрытия; 11 - регулировочная гайка; 12 – крышка; 13 - регулировочный винт.

*Принцип действия устройства* (ПОЗ-Т в комплекте с ИКТ) основан на изменении цвета индикаторного элемента в местах прохождения через него испытуемого авиатоплива. Механические примеси отфильтровываются на белом (первом по ходу авиатоплива) слое ИКТ и оставляют на нем темные отпечатки, по интенсивности окраски которых определяется загрязненность топлива механическими примесями. Эмульсионная вода при прохождении через ИКТ оставляет на желтом слое сине-голубые отпечатки, количество которых зависит от ее содержания в авиатопливе.

## 2. Экспериментальная часть

Получают пробу авиационного керосина.

### *Порядок проведения эксперимента*

- осмотреть приспособление и убедиться в отсутствии внешних повреждений;
- повернуть рычаг открытия-закрытия датчика вверх до отказа;



- вставить в разъем датчика ИКТ белым слоем к подвижной крышке датчика;
- поворотом рычага открытия-закрытия до отказа зажать в датчике ИКТ;
- погрузить датчик и часть цилиндра (на 1...2 см) в испытуемое авиатопливо и произвести постепенное всасывание топлива в течение 7... 10 сек.;
- не вынимая датчика из топлива, сделать выдержку 2...3 сек.
- открыть датчик и извлечь ИКТ из датчика. Топливо из цилиндра выталкивается штоком поршня.

Сразу после извлечения ИКТ (во влажном состоянии) рассматривается на белом фоне. При отсутствии видимых отпечатков содержание эмульсионной воды и механических примесей принимается по данному методу за отсутствие. Наличие одного или двух отпечатков – предупредительный знак. Наличие трех отпечатков – браковочный признак.

По серо-коричневым отпечаткам определяется загрязненность авиатоплива механическими примесями путем сравнения их с контрольными отпечатками.

Делается вывод о пригодности АТ к применению.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Назовите способы оценки чистоты авиационных топлив.
2. Что такое чистота топлива?
3. Назовите виды механических загрязнений, присутствующих в авиационных топливах.
4. Опишите методику оценки загрязненности топлива на ПОЗ-Т.
5. Опишите визуальный метод оценки загрязненности АТ.
6. Опишите принцип действия ПОЗ-Т с ИКТ.
7. Назовите возможные негативные последствия содержания механических примесей в топливах.
8. Назовите возможные негативные последствия наличия воды в АТ.
9. Назовите фазовые состояния воды в топливной системе ВС и в авиатопливе. Наличие какой фазы оценивается на ПОЗ-Т?
10. Назовите применяемые способы очистки авиационных топлив от загрязнений.
11. Какие требования предъявляются к чистоте АТ?
12. Какие критерии оценки загрязненности АТ применяются при его анализе на ИКТ?

## Лабораторная работа № 5. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ

Цель работы:

- изучить низкотемпературные свойства авиационных топлив;
- знать влияние низкотемпературных свойств на эксплуатацию топливных систем ВС и АД;
- уметь определять показатели низкотемпературных свойств в соответствии с ГОСТ 5066-2018.

### 1. Теоретическое введение

Изменения свойств авиационных ГСМ в условиях низких температур окружающей среды – низкотемпературные свойства (НТС) – непосредственно связаны с таким эксплуатационным свойством как прокачиваемость. Низкотемпературные свойства прежде всего *определяют* величину гидравлических сопротивлений топлива в топливной системе ВС и АД и, как следствие, бесперебойность подачи топлива в камеру сгорания АД. В конечном итоге данные свойства обеспечивают безопасность эксплуатации ВС, особенно в России, т. к. многие регионы нашей страны расположены в холодном климатическом поясе.

*Низкотемпературные свойства* характеризуются комплексом физико-химических явлений, возникающих при температурах ниже  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Основными причинами ухудшения НТС являются наличие в топливе парафиновых углеводородов, которые имеют свойство кристаллизоваться при отрицательных температурах, и увеличение вязкости топлив при снижении температуры.

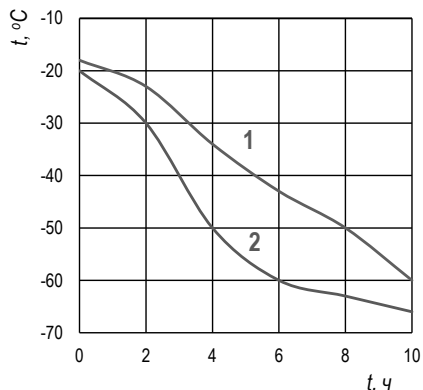
*Показателями* НТС, связанными с наличием в топливе парафиновых углеводородов, являются:

- **температура помутнения**  $t_{\text{пом.}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$  – максимальная температура, при которой в испытуемом топливе наблюдается появление мути (ухудшается его прозрачность и текучесть);
- **температура начала кристаллизации**  $t_{\text{н.кр.}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$  – максимальная температура, при которой в испытуемом топливе невооруженным глазом обнаруживаются первые кристаллы углеводородов.

Из этих двух показателей для АТ нормируется только  $t_{\text{н.кр.}}$ .

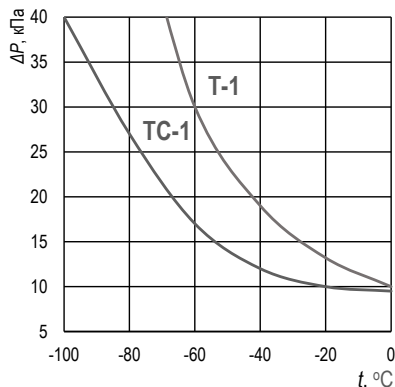
В процессе эксплуатации происходит охлаждение топлива, степень которого определяется рядом факторов: температурой окружающего воздуха; скоростью, высотой и продолжительностью полета; компоновкой и конструктивным исполнением топливных баков; порядком выработки топлива из баков; начальной температурой топлива; объемом топливных баков и заправленного топлива и пр. Скорость охлаждения объема топлива зависит от его теплопроводности. Зависимость температуры топлива от продолжительности полета показана на рис. 1. При снижении температуры топлива также значительно изменяются и другие эксплуатационные свойства,

прежде всего плотность и вязкость. Зависимость изменения вязкости топлива от температуры показана на рис. 2.

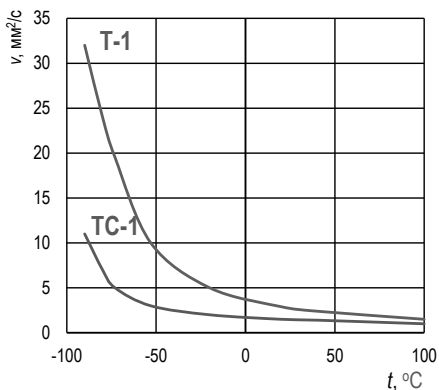


**Рис. 1.** Зависимости температуры топлива в расходном баке (1) и в баке № 3 (2) от продолжительности полета самолета Ту-154 при заправке в условиях отрицательных температур

Изменение данных свойств авиационных топлив в комплексе приводят к значительному изменению их текучести и прокачиваемости. Влияние изменения низкотемпературных свойств топлива на величину гидравлических потерь показано на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость гидравлических потерь от температуры при течении топлив по трубопроводу диаметром 0,005 м и длиной 25 м



**Рис. 2.** Зависимости кинематической вязкости топлив от температуры

Увеличение гидравлических сопротивлений вследствие снижения текучести топлив *оказывает влияние* на фильтруемость топлива, его прокачиваемость по магистралям топливной системы, качество распыла топлива топливными форсунками, полноту сгорания топлива в камере сгорания АД, экономичность и КПД АД и др.

*К факторам*, влияющим на низкотемпературные свойства, относят: углеводородный состав, вязкость и плотность топлива, внешнее давление, режим течения и перемешивания топлива,

конструктивные факторы (форма, размер, материал топливных баков, магистралей, агрегатов и т. п.), загрязненность топлива и пр.

В связи с указанным, содержание парафиновых углеводородов в авиационных топливах ограничивается. Полностью избавиться от их присутствия невозможно по экономическим причинам (табл. 1).

Таблица 1  
Выход реактивных топлив из нефти в зависимости от температуры начала кристаллизации

Температура $t_{н.кр.}$ , °С	-80	-75	-70	-60
Выход топлива, % (по массе)	100	125	133	150

Оценку низкотемпературных свойств авиаГСМ проводят, используя ряд стандартных методов. К ним относятся определение температуры застывания (потери текучести) топлив и масел по ГОСТ 20281, определение точки замерзания топлив по ГОСТ 5066-2018 (ИСО 313), определение кинематической и динамической вязкости топлив по ГОСТ 33768-2015, а также температур помутнения и начала кристаллизации топлив по методу ГОСТ 5066-2018.

Настоящая лабораторная работа посвящена определению показателей НТС реактивных топлив для ГА по ГОСТ 5066-2018 с использованием аппарата Кристалл-10Э (рис. 4).

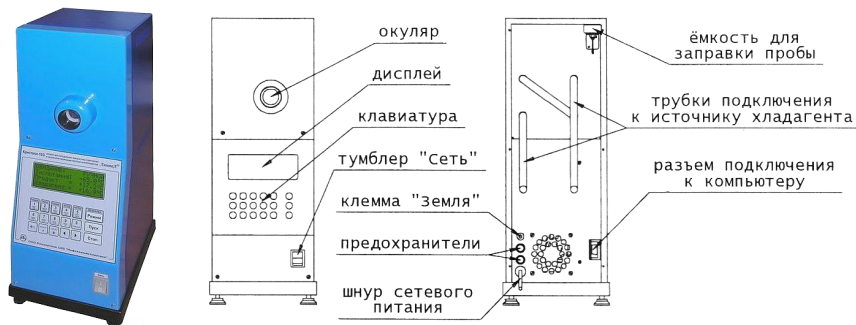


Рис. 4. Внешний вид и устройство аппарата Кристалл-10Э

Кристалл-10Э – это моноблок, в нижней части лицевой стороны которого расположены электронные схемы измерения, управления и питания. На лицевую панель выведены дисплей для отображения информации о состоянии аппарата и клавиатура для управления работой аппарата.

В верхней части передней панели расположен окуляр для визуального наблюдения за изменениями, происходящими в сосуде с опытным образцом.

В верхней части задней панели прибора справа установлена емкость для заливки пробы продукта, а ниже – трубки для подключения аппарата к крану с холодной водой для обеспечения охлаждения аппарата.

Мешалка для перемешивания пробы продукта включается автоматически при запуске испытания.

*Сущность испытания* состоит в определении изменения прозрачности образца авиатоплива и образования в топливе кристалла(ов) углеводородов при понижении температуры до значительных отрицательных значений.

## **2. Экспериментальная часть**

В чистый сухой сосуд для пробы помещают 5 см<sup>3</sup> топлива.

Подключают аппарат к электросети и включают тумблер «Сеть». После этого аппарат начинает самодиагностику и на дисплее появляется информационная заставка. При выявлении неисправностей на дисплее появляется соответствующее сообщение. Дальнейшая работа аппарата невозможна до устранения неисправности. В случае отсутствия ошибок аппарат переходит в режим ожидания.

Далее работа может осуществляться в ручном или автоматическом режиме. Работа в ручном режиме позволяет наиболее точно определить оба показателя НТС.

### **Работа в ручном режиме (Режим А прибора)**

В режиме ожидания нажмите клавишу «Режим» (аппарат переходит в стандартный режим работы).

В режиме ожидания на дисплей выводится следующая информация:

- режим испытания;
- наименование продукта;
- ожидаемая температура помутнения и (или) начала кристаллизации;
- текущая температура продукта и хладагента.

Если требуется, необходимо отредактировать входные параметры.

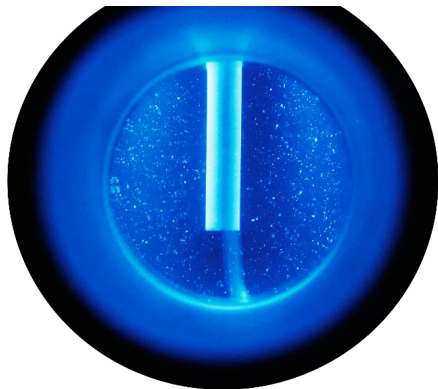
Нажмите клавишу «Пуск».

Аппарат перейдет в режим измерения и начнет охлаждения испытуемого образца с максимальной скоростью. При этом включается интенсивное перемешивание пробы. На дисплее выводится следующая информация:

- режим испытания;
- наименование продукта
- ожидаемая температура начала кристаллизации;
- текущая температура пробы.

При достижении температуры пробы на 5 °С выше ожидаемой температуры кристаллизации, скорость охлаждения замедляется до заданной по требованиям ГОСТ. Через каждый градус понижения температуры раздается звуковой сигнал.

На протяжении работы прибора визуально контролируется состояние топлива.



**Рис. 5.** Наличие кристаллов углеводородов в топливе Jet-A при 54 °С

Если при наличии растворенной воды появилось помутнение, препятствующее наблюдению кристаллов углеводорода, то пробу перед испытанием следует просушить над безводным сульфатом натрия.

Температуру, при которой в испытуемом топливе наблюдается появление мути, принимают за температуру помутнения данного образца топлива.

После определения температуры помутнения испытуемое топливо продолжают охлаждать и перемешивать. За температуру начала кристаллизации принимают максимальную температуру, которую показывает термометр при появлении в топливе первых кристаллов, видимых невооруженным глазом (рис. 5).

### 3. Контрольные вопросы

1. Опишите изменение эксплуатационных свойств авиационных топлив при понижении температуры.
2. Назовите основные показатели низкотемпературных свойств.
3. Назовите факторы, влияющие на изменение НТС.
4. Дайте определение температуры помутнения и температуры начала кристаллизации АТ. Назовите нормы НТС в соответствии с ГОСТ 10227-2013.
5. По какой причине из авиационных топлив не удаляются полностью парафиновые углеводороды?
6. Опишите методику определения низкотемпературных свойств в соответствии с ГОСТ 5066-2018.
7. Опишите прибор для определения низкотемпературных свойств в соответствии с ГОСТ 5066-2018.
8. Опишите влияние изменения низкотемпературных свойств авиационных топлив на работу узлов и агрегатов ВС и АД.
9. От каких факторов зависит степень охлаждения топлива в топливных системах ВС?
10. Какими способами возможно обеспечить бесперебойную прокачиваемость АТ по магистралям топливных систем при отрицательных температурах?

## Лабораторная работа № 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗАГРЯЗНЕНИЙ И КЛАССА ЧИСТОТЫ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ

Цель работы:

- изучить способы оценки чистоты авиационных топлив;
- знать влияние наличия загрязнений в авиационных топливах на работу узлов и агрегатов топливных систем;
- уметь определять гранулометрический состав проб авиационных топлив и их класс чистоты в соответствии с ГОСТ 17216-2001.

### 1. Теоретическое введение

Теоретическое введение, касающееся чистоты авиационных топлив, методов ее оценки и влияния различных видов загрязнений на работу узлов и агрегатов топливных систем ВС и АД рассмотрено в теоретической части лабораторной работы № 2. Взаимодействие авиационного топлива с водой.

Данная лабораторная работа посвящена изучению метода оценки гранулометрического состава загрязнений и определения класса чистоты авиационного топлива с помощью анализатора *ГРАН-152.1* (*гранулометрический анализатор*).

Данный метод является достаточно простым, быстрым, достоверным и информативным микроскопическим методом, осуществляющим подсчет количества взвешенных частиц различных размеров, их классификацию по размерным группам и определение класса чистоты жидкости в соответствии с нормами ГОСТ 17216-2001. Промышленная чистота. Классы чистоты жидкостей.

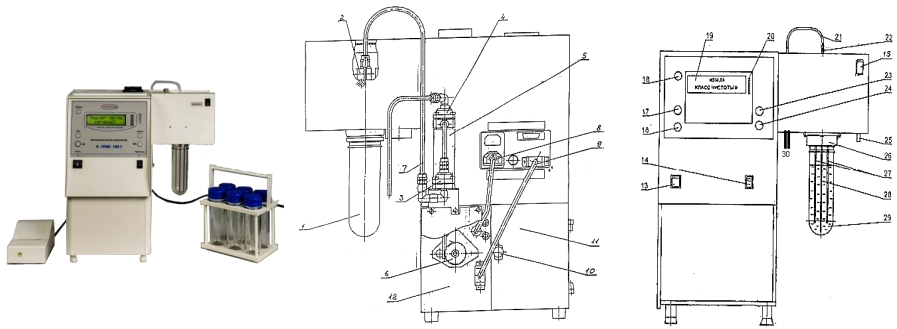
Метод позволяет выразить загрязненность топлива эмпирическим числовым показателем «*класс чистоты*». Чем выше класс чистоты жидкости, тем больше в ней загрязняющих частиц. Всего определено 19 классов чистоты.

Изначально метод применялся для оценки чистоты гидравлических жидкостей, но на данный момент в силу своей простоты, универсальности и удобства применяется для различных ГСМ: рабочих жидкостей гидравлических систем привода и управления машин, приводов инструментов; смазочных масел, жидких топлив, растворителей.

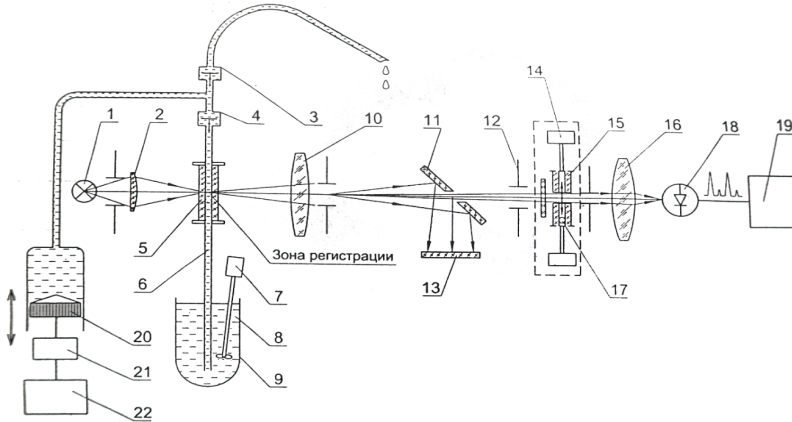
#### Принцип действия прибора

Внешний вид и конструкция прибора ГРАН 152-1 показаны на рис. 1.

Подсчет количества частиц по различным размерным группам осуществляется методом амплитудной классификации электрических импульсов, вырабатываемых в первичном преобразователе в момент пересечения частицами фотометрируемой зоны регистрации. Классификация импульсов по размерным группам осуществляется пятью компараторами, пороги срабатывания которых пропорциональны той части площади зоны регистрации кюветы, которая перекрывается поперечным сечением частицы (рис. 2).



**Рис. 1.** Внешний вид и конструкция ГРАН 152-1 (вид сзади, вид спереди): 1 – пробоотборник; 2 – кювета; 3 – входной клапан; 4 – выходной клапан; 5 – цилиндр; 6 – привод поршня; 7 – соединительная трубка; 8 – кабель питания двигателя; 9 – кабель управления; 10 – винт; 11 – дверца; 12 – блок дозатора; 13 – выключатель «Сеть»; 14 – выключатель «Принтер»; 15 – выключатель «Мешалка»; 16 – кнопка «ДА»; 17 – кнопка «НЕТ»; 18 – кнопка «Сброс»; 19 – алфавитно-цифровой индикатор (АЦИ); 20 – «линейка» светодиодов; 21 – трубка; 22 – выходной штуцер кюветы; 23 – кнопка «Лента»; 24 – кнопка «МП» (Reset); 26 – гнездо мешалки; 27 – лопасти; 28 – отсасывающая трубка; 29 – пробоотборник; 30 – сливная трубка



**Рис. 2.** Принципиальная оптико-гидравлическая схема анализатора ГРАН: 1 – источник света, 2 – конденсор, 3 – клапан обратный, 4 – клапан прямой, 5 – изм. Кювета, 6 – пробоотборная трубка, 7 – мешалка, 8 – проба топлива, 9 – пробоотборная емкость, 10 – линза, 11 – зеркало, 12 – полевая диафрагма, 13 – экран для визуализации зоны регистрации, 14 – побудитель колебаний образцовой частицы, 15 – калибровочная кювета, 16 – линза, 17 – образцовая частица, 18 – фотоприемник, 19 – микропроцессорный блок, 20 – насос поршневой, 21 – переключатель редукции, 22 – привод насоса



Анализируемая жидкость (8) под воздействием разрежения, создаваемого в цилиндре (20) поршневого насоса, прокачивается через стеклянную измерительную кювету (5). Осветитель (1, 2) через зону регистрации кюветы и оптическую систему (10...16) посылает световой поток на фотоприемник (18). Каждая из взвешенных в анализируемой жидкости частиц при пересечении просвечиваемой зоны регистрации кратковременно экранирует световой поток. При этом на фотоприемнике формируется электрический импульс, амплитуда которого пропорциональна площади поперечного сечения частицы (рис. 2) в пределах зоны регистрации. Импульсы, вырабатываемые в моменты пересечений частицами просвечиваемой зоны, поступают на входы пяти пороговых устройств (компараторов), посредством которых они в зависимости от амплитуды классифицируются на пять отдельных групп, адекватных размерным группам частиц в интервалах: от 5 до 10 мкм, от 10 до 25 мкм, от 25 до 50 мкм, от 50 до 100 мкм, от 100 и более мкм.

В случаях регистрации частиц неправильной геометрической формы, измерительная схема анализатора определяет их размер как диаметр некой эквивалентной сферической частицы, имеющей такое же поперечное сечение, как у частицы неправильной формы. С выходов компараторов электрические импульсы поступают в электронный блок, в котором они регистрируются по пяти различным каналам, соответствующим частицам различных размерных групп (5 – 10, 10 – 25, 25 – 50, 50 – 100, 100 и более мкм). Так как ГОСТ 17216 - 2001 определяет класс чистоты по числу частиц каждой группы в  $100 \text{ см}^3$  жидкости, а объем единичной пробы равен 10, 25 или  $50 \text{ см}^3$ , процессор умножает число частиц, обнаруженных в каждой группе, на соответствующий коэффициент, сопоставляет результаты расчета с нормами стандарта и определяет класс чистоты анализируемой жидкости. Если нужен результат анализа именно  $100 \text{ см}^3$  жидкости, следует выполнить два анализа с объемом  $50 \text{ см}^3$  и усреднить полученные результаты.

Результаты измерений распечатываются на бумажной ленте цифropечатающего устройства (ЦПУ) и выводятся на экран алфавитно-цифрового индикатора.

Следует отметить наличие в анализаторе автоматической калибровки, что упрощает его метрологическое обслуживание за счет исключения из обязательных регламентных работ трудоемких процедур калибровки с применением различных образцовых сред.

## **2. Экспериментальная часть**

Получить пробу авиационного керосина.

Включить анализатор, на экране высветится: «Прибор».

Прооботборник с анализируемой жидкостью ввинтить в узел мешалки. Включить тумблер мешалки и в течение 10-20 секунд размешивать пробу. После этого мешалку выключить.

Нажатием на кнопку ДА анализатор перевести в режим «Подсчет частиц, согласны?»

Нажать на кнопку ДА. Анализатор переходит в режим, в котором Пользователь последовательными нажатиями на кнопку НЕТ устанавливает на экране анализатора требуемое значение дозируемого объема пробы  $V$  и минимальный размер регистрируемых частиц, начиная от которого производится подсчет частиц (от 5 или от 10 мкм).

Нажатием на кнопку ДА включить дозатор. В этом режиме из трубки отбора пробы и кюветы выдавливается жидкость, оставшаяся от предыдущего измерения. Взамен нее кювета заполняется новой пробой. Через несколько секунд анализатор переходит в режим подсчета частиц. На экране в верхней строчке слева индицируется общее количество подсчитанных частиц ( $n_0$ ), а справа – порядковый номер измерений. На нижней строчке экрана высвечено: слева – значение объема жидкости, протекшей через кювету от начала измерения. Справа – время, протекшее от начала измерения. В момент, когда через кювету протечет установленный объем жидкости  $V$ , счет частиц прекратится, дозатор выключится, а на экране высветятся результаты гранулометрического состава.

В момент проведения анализа в анализируемой жидкости, в особенности на участке зоны регистрации измерительной кюветы, не должны находиться воздушные пузырьки. Наличие в жидкости воздушных пузырьков может существенно исказить результаты измерений, так как пузырьки в потоке жидкости будут регистрироваться также как механические частицы загрязнений. Наблюдать за зоной регистрации возможно через окошко перископа на верхней панели прибора, на которое с десятикратным увеличением проецируется изображение потока жидкости со всеми ее включениями.

После завершения измерений происходит распечатка результатов измерений на бумажную ленту принтера.

После распечатки результатов на экране анализатора высвечивается индекс класса чистоты измеренной пробы.

Записать значение класса чистоты, по табл. 1 определить загрязненность АТ в г/т.

При использовании сильнозагрязненной жидкости промыть гидравлический тракт анализатора от оставшихся в нем загрязнений. Для этого прокачать дозатором чистую жидкость в объеме не менее 50 мл.

Выключить прибор отключить его от сети.

Сделать заключение о возможности применения данного АТ на ВС.

## Классы чистоты жидкости и масса загрязнений

Класс чистоты жидкостей	Число частиц загрязнителя в $(100 \pm 0,5)$ см <sup>3</sup> жидкости при размере частиц, мкм, не более									Масса загрязнителей, %, не более	
	от 0,5 до 1	св. 1 до 2	св. 2 до 5	св. 5 до 10	св. 10 до 25	св. 25 до 50	св. 50 до 100	св. 100 до 200	до волокна		
00	800	400	32	8	4	1		АО	АО	Не нормируется	
0	1600	800	63	16	8	2	Отсутствие	АО	Отсутствие		
1		1600	125	32	16	3					
2			250	63	32	4	1	Отсутствие	Отсутствие		
3				125	63	8	2				
4				250	125	12	3				
5				500	250	25	4				1
6				1000	500	50	6				2
7				2000	1000	100	12	4	2		
8				4000	2000	200	25	6	3		
9				8000	4000	400	50	12	4		
10	Не нормируется			16000	8000	800	100	25	5		0,0005
11				31500	16000	1600	200	50	10		0,001
12				63000	31500	3150	400	100	20		0,002
13					63000	6300	800	200	40		0,004
14					125000	12500	1600	400	80		0,008
15						25000	3150	800	160		0,016
16						50000	6300	1600	315	0,032	
17							12500	3150	630	0,064	

## Примечания

1 «Отсутствие» означает, что при взятии одной пробы жидкости частицы заданного размера не обнаружены или при взятии нескольких проб общее число обнаруженных частиц меньше числа взятых проб.

2 «АО» - абсолютное отсутствие частиц загрязнителя.

3 Зависимость класса чистоты жидкостей от массы содержащегося в ней загрязнителя с учетом числа частиц загрязнителя в жидкости является справочной. Массы приведены для частиц загрязнителя со средней плотностью  $4 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и плотностью жидкости  $1 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

## 3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение чистоте авиаГСМ.
2. Что такое класс чистоты?
3. Назовите виды загрязнений авиационных топлив.
4. Опишите влияние наличия загрязнений в АТ на эксплуатацию топливных систем ВС и АД.
5. Назовите способы оценки чистоты АТ.
6. Опишите методику определения класса чистоты АТ в соответствии с ГОСТ 17216-2001.
7. Опишите принцип действия прибора ГРАН 152-1.
8. Как соотносятся между собой класс чистоты и масса загрязнений? С каким классом чистоты возможно допускать АТ к применению на ВС?

## Лабораторная работа № 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ТОПЛИВАХ ВЕСОВЫМ МЕТОДОМ

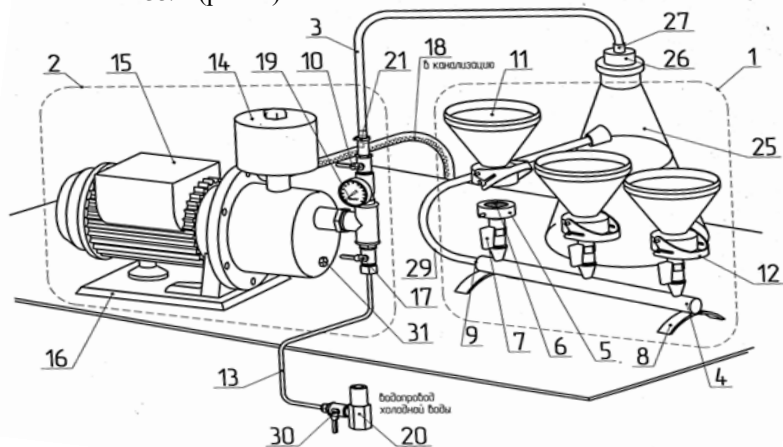
Цель работы:

- изучить способы оценки чистоты авиационных топлив;
- знать влияние наличия загрязнений в авиационных топливах на работу узлов и агрегатов топливных систем;
- уметь определять содержание механических примесей в топливах в соответствии с ГОСТ 10577-78.

### 1. Теоретическое введение

Теоретическое введение, касающееся чистоты авиационных топлив, методов ее оценки и влияния различных видов загрязнений на работу узлов и агрегатов топливных систем ВС и АД обсуждалось в лабораторной работе № 2. Взаимодействие топлива с водой.

Данная лабораторная работа посвящена изучению метода оценки содержания механических примесей в топливах соответствии с ГОСТ 10577-78 на установке ПФФ-35/1 (рис. 1).



**Рис. 1.** Прибор вакуумного фильтрования ПФФ-35/1

*Сущность метода* заключается в определении массы механических примесей, задерживаемых мембранными нитроцеллюлозными или ацетатными фильтрами при фильтровании через них испытуемого нефтепродукта. Метод не применяют для анализа нефтепродуктов, содержащих более 0,1 % нерастворенной воды.

Прибор состоит из следующих основных частей (рис. 1): ячейки фильтровальной (1), вакуумной станции (2), соединительного шланга (3).

Ячейка фильтрования (1) включает в себя: коллектор (4) с основанием (5), на верхнем торце которого имеются фритты (6), на которых размещаются фильтрующие мембраны. Краны (7) предназначены для запираания

отсасывающих каналов воронки. Коллектор имеет опоры (8), штуцер (9) для присоединения вакуумного шланга (3) (или шланга (29)).

Воронки (11) снабжены пружинными зажимами (12), посредством которых они крепятся на основании (5).

Вакуумная станция (2) включает в себя: емкость (14), насос (15), основание (16), краны (10), (17), (30), шланг (3) к коллектору (4), трубку белую (13), кран (30) для присоединения к переходнику (20), который крепится на водопроводной линии, а также соединительные патрубки и фитинги.

Прибор укомплектован ресивером для сбора отфильтрованных жидкостей.

Ресивер включает в себя: колбу (25) с одной горловиной и боковым штуцером, пробку (26), штуцер (27) и соединительные шланги (3) и (29).

## 2. Экспериментальная часть

Получают пробу топлива ( $\sim 400 \text{ см}^3$  для одного определения).

Фильтруют растворитель через мембранный фильтр.

Внутреннюю поверхность фильтровальной воронки, сетку под мембранный фильтр тщательно протирают льняной тряпочкой, смоченной профильтрованным растворителем, затем промывают растворителем.

Фильтры мембранные нитроцеллюлозные или ацетатцеллюлозные «Владипор» марки МФА-МА № 9 с порами 0,85-0,95 мкм высушивают 30 мин в сушильном шкафу при температуре  $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ . Охлаждают 30 мин в эксикаторе и взвешивают с погрешностью не более 0,0002 г. Операцию высушивания фильтров повторяют до получения расхождения между последовательными взвешиваниями не более 0,0002 г.

Бутылку с пробой топлива взвешивают на весах с погрешностью не более 0,5 г, перемешивают и фильтруют через мембранный фильтр на приборе ПВФ-35/1 под вакуумом 0,15- 0,20 кг/см<sup>2</sup>.

Фильтрация с помощью прибора производится в следующем порядке:

- приподняв зажим (12), снять воронку (11) с основания (5);
- положить на основание мембрану и установить воронку, зафиксировав ее зажимом;
- закрыть краны ячейки фильтровальной и вакуумной станции (7) и (10);
- отвернуть пробку на емкости (14) и заполнить водопроводной водой емкость, насос (15) и магистрали вакуумной станции (2) (до появления воды в шланге (18)). Завернуть пробку на емкости (14);
- залить в воронку пробу исследуемого топлива;
- открыть кран (7) под воронкой с пробой топлива;
- вставить вилку в розетку и включить насос;
- через 5-10 сек открыть кран (10);
- произвести фильтрацию пробы топлива (вакуум 0,15 – 0,20 кг/см<sup>2</sup>);
- после окончания фильтрации профильтрованным растворителем тщательно ополоснуть бутылку, в которой была проба топлива и промывной продукт снова профильтровать через тот же мембранный

фильтр; частицы механических примесей, приставшие к стенкам воронки, снять стеклянной палочкой с наконечником из хлорвиниловой трубки, с которого затем смыть их на фильтр растворителем с помощью промывалки с резиновой грушей;

- по окончанию процесса фильтрации закрыть сначала кран (7) под воронкой, потом кран (10) и после чего выключить насос;
- приподняв зажим (12), снять воронку (11) с основания (5) и извлечь мембранный фильтр с осадком, поместить его в стаканчик и сушить в сушильном шкафу в течение 30 мин при температуре  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . Затем охладить в течение 30 мин в эксикаторе и взвесить на весах с погрешностью 0,0002 г.

Бутылку, в которой содержалась проба топлива, взвесить с погрешностью не более 0,5 г и по разности масс бутылки до и после фильтрования определить массу профильтрованного продукта.

Массовую долю механических примесей ( $X_{\text{мп}}$ ) в процентах вычисляют по формуле

$$X_{\text{мп}} = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \cdot 100,$$

где  $m_1$  - масса стаканчика с мембранным фильтром после анализа, мг;

$m_2$  - масса стаканчика с мембранным фильтром до анализа, мг;

$m_3$  - масса испытуемого топлива, мг.

Массовую долю механических примесей вычисляют с точностью до 0,0001 %.

За результат анализа принимают среднее арифметическое значение двух последовательных определений.

Сделать заключение о возможности применения данного АТ на ВС.

### 3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение чистоте авиаГСМ.
2. Дайте определение механическим загрязнениям.
3. Назовите виды загрязнений авиационных топлив.
4. Опишите влияние наличия загрязнений в АТ на эксплуатацию топливных систем ВС и АД.
5. Назовите способы оценки чистоты АТ.
6. Опишите методику определения содержания механических примесей в АТ в соответствии с 10577-78.
7. Какие требования предъявляются к чистоте АТ?
8. Опишите принцип действия прибора ПВФ-35/1.
9. Опишите прибор для определения содержания механических примесей в АТ в соответствии с 10577-78.

## Лабораторная работа № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОБЩЕЙ И МЕРКАПТАНОВОЙ СЕРЫ В АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВАХ

Цель работы:

- изучить эксплуатационное свойство авиатоплив – коррозионность;
- знать влияние коррозионных свойств АТ на эксплуатацию топливных систем ВС и АД;
- уметь определять содержания общей и меркаптановой серы в авиатопливах в соответствии с ГОСТ 52030-2003.

### 1. Теоретическое введение

Одним из эксплуатационных свойств авиационных топлив является коррозионность (коррозионные свойства). **Коррозия** – это разрушение металлов вследствие воздействия внешней среды. Во-первых, различные химические элементы и соединения, входящие в состав авиационных топлив, не должны вызывать повышенной коррозии конструктивных элементов ВС и АД, а во-вторых, желательно, чтобы АТ обладали свойством предотвращения коррозии этих элементов.

Наблюдаются следующие виды коррозии деталей самолетных систем, контактирующих с топливом и продуктами его сгорания: химическая, электрохимическая, газовая и биохимическая.

К наиболее агрессивным элементам и соединениям, содержащимся в АТ и интенсифицирующим коррозию деталей, относятся: содержащие меркаптановую серу (метилмеркаптан, этилмеркаптан, пропилмеркаптан), сероводород; свободная сера, органические кислоты и щелочи, нерастворенная вода и пр. Присадки к АТ также могут выступать в качестве коррозионных агентов, например, ПВКЖ «И-М» агрессивна к конструкционным элементам, особенно к резинотехническим изделиям и герметикам.

Сернистые соединения и элементарная сера наиболее активно взаимодействуют с бронзами и кадмиевыми покрытиями, а кислородные соединения – со сталями. Крайне интенсивно коррозионные процессы протекают в присутствии воды и при повышенных температурах.

Коррозия не только уменьшает ресурс и ухудшает характеристики элементов топливных систем, но и приводит к их разрушению. Из-за увеличения трения в результате коррозии регистрируются случаи разрушения рессоры ротора, самого ротора, плунжеров топливных насосов, наклонной шайбы и других ответственных деталей. Меркаптановая сера разрушает кадмиевое покрытие деталей (прежде всего пружин). Образующиеся в результате коррозии механические загрязнения (в виде твердых частиц размерами от 1 мкм) и студенистые отложения могут вызывать забивку ФТО, проходных сечений и жиклеров, форсунок и пр., интенсифицировать изнашивание трущихся поверхностей, вызывать заклинивание прецизионных пар ТРА, клапанов и пр.

В товарном керосине на углеродистых сталях коррозия появляется на 7...20-е сутки, на легированных – 15...75 сутки.

Гидроочищенные топлива обладают значительно лучшими коррозионными свойствами, а коррозии цветных металлов даже при повышенной температуре не вызывают вовсе.

При сгорании любых сернистых соединений в ГТД образуется сернистый газ ( $\text{SO}_2$ ), вступающий при температурах свыше  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  в реакцию с никелем, содержащимся в легированных сталях. Эвтектическая точка системы никель - сернистый никель ( $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ) приблизительно равна  $650\text{ }^\circ\text{C}$ . Эти места интенсивно выгорают, вызывая разрушение деталей (газовую коррозию). Чем выше содержание серы, тем выше скорость коррозии и ниже температура, при которой она начинается. Газовая коррозия внешне проявляется как газэрозийный износ материала, характеризующийся вначале появлением отдельных точечных раковин, со временем увеличивающихся по площади и глубине, которые затем образуют сплошные раковины и прогары. Такая коррозия наблюдается на деталях, расположенных в наиболее горячей части двигателя (стенках камер сгорания, лопатках соплового аппарата и первой ступени турбины), причем чаще всего этот вид разрушения наблюдается на деталях, расположенных ближе к оси двигателя и в значительной степени определяет их ресурс.

Разновидностью газовой коррозии является осповидное выветривание внутренних поверхностей жаровых труб, передних диффузоров головок камер сгорания и других элементов газового тракта, работающих при температурах не более  $450\text{ }^\circ\text{C}$  и имеющих контакт с топливозвоздушной смесью. Поражение располагается участками от 1 до  $5\text{ м}^2$  глубиной от 0,2 мм до сквозных раковин.

Интенсивность газовой коррозии определяется свойствами металла и топлива, однако молекулярный механизм газовой коррозии остается невыясненным. С точки зрения влияния свойств топлива установлено, что интенсивность газовой коррозии зависит от содержания в топливе ванадия, серы и натрия. Например, при увеличении содержания в топливе ванадия от 0 до 0,0006 % по массе интенсивность газовой коррозии возрастает в 100 с лишним раз, а при увеличении содержания серы от 0,01 до 0,15 % по массе скорость коррозии возрастает примерно в 7 раз.

Учитывая агрессивность указанных элементов и соединений и влияние на надежность работы топливных систем, содержание их в АТ регламентируется или не допускается.

Существуют следующие *методы оценки* коррозионных свойств авиатоплив: испытание на медной пластинке (ГОСТ 6321-92), определение содержания серы (табл. 1), определение содержания меркаптановой серы (ГОСТ 52030-2003) и испытание на кислотность (ГОСТ 6307-75).



Методы определения содержания серы

Метод	ГОСТ
Бомбовый метод	3877
Ламповый метод	P51859, 19121
Сжигание в кислородно-водородной горелке	—
Сжигание в кварцевой трубке	1437
Высокотемпературный метод	—
Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ (ВДРФА)	P 52660- 2006
Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ (ЭДРФА)	P 50442, P51947
Окислительный пиролиз и УФ флуоресценция	РЕН ИСО 20846-2006



**Рис. 1.** Титратор Mettler Toledo T-50

Данная лабораторная работа посвящена определению содержания общей и меркаптановой серы в АТ по ГОСТ 52030-2003.

*Сущность метода.* Образец растворяют в спиртовом растворе уксуснокислого натрия и титруют потенциометрическим методом спиртовым раствором азотнокислого серебра. Меркаптановая сера выпадает в осадок в виде меркаптида серебра, конечная точка титрования будет показана большим изменением потенциала элемента.

Метод реализован на автоматическом титраторе Mettler Toledo T-50 (рис. 1).

## 2. Экспериментальная часть

Перед проведением испытания образец испытывают качественно на сероводород ( $H_2S$ ), встряхивая  $5\text{ см}^3$  образца с  $5\text{ см}^3$  кислого раствора сернокислого кадмия ( $CdSO_4$ ). Если осадок не появляется, проводят анализ образца.

Если появляется желтый осадок, сероводород удаляют. Для этого объем образца, в три-четыре раза больший, чем требуется для анализа, помещают в делительную воронку, содержащую кислый раствор сульфата кадмия в количестве, равном половине объема образца, и энергично встряхивают. Сливают и выбрасывают водную фазу, содержащую желтый осадок. Повторяют экстрагирование другой порцией кислого раствора сульфата кадмия. Снова сливают водную фазу и промывают образец тремя порциями воды по  $25\text{-}30\text{ см}^3$ , выливая воду после каждого промывания.

Фильтруют топливо через бумажный фильтр. Проводят испытание небольшой порции промытого образца в пробирке с небольшим количеством

раствора сернистого кадмия. Если дальнейшего выпадения осадка не происходит, проводят анализ, если осадок появляется, повторяют экстрагирование с раствором  $\text{CdSO}_4$  до полного удаления сероводорода.

Некоторые нефтепродукты прямой перегонки, особенно полученные из природных газоконденсатов, могут содержать значительные количества как низкомолекулярных меркаптанов, так и растворенной элементной серы, которые при нагревании в условиях перегонки могут выделять сероводород. Поэтому в процессе удаления сероводорода (и после его полного выделения) желательно образец не нагревать.

Если полученные результаты испытания не являются арбитражными и имеется протокол гарантии качества / контроля качества (QA/QC), может быть использовано альтернативное испытание по удалению сероводорода. Для этого используют бумагу, пропитанную ацетатом свинца и бикарбонатом натрия.

Проведение эксперимента осуществляется в соответствии с руководством по эксплуатации титратора Mettler Toledo T-50.

Продолжительность титрования должна быть как можно короче, чтобы избежать окисления соединений серы атмосферным кислородом.

Начатое титрование нельзя прерывать и затем продолжать.

Зарегистрировать в отчете полученные значения содержаний в образце элементарной и меркаптановой серы.

Сделать вывод о проведенной работе и кондиционности образца АТ.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Дайте определение коррозии. Перечислите виды коррозии, которым подвержены конструкционные материалы ВС и АД, контактирующие с топливом.
2. Назовите причины коррозионности АТ.
3. Назовите влияние коррозии деталей, контактирующих с АТ, на работу узлов и агрегатов ВС и АД.
4. Назовите методы оценки коррозионных свойств АТ.
5. Опишите принцип действия прибора Mettler Toledo T-50.
6. Опишите методику определения содержания общей и меркаптановой серы в АТ по ГОСТ 52030-2003.
7. Перечислите факторы, влияющие на коррозионную активность АТ.
8. Назовите методы снижения коррозионных свойств АТ.

## Лабораторная работа № 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВАХ

Цель работы:

- изучить способы оценки чистоты авиационных топлив;
- знать влияние наличия воды в топливах и топливных система ВС и АД на их эксплуатацию;
- уметь определять содержание воды в авиационных топливах в соответствии с ГОСТ 56340-2015.

### 1. Теоретическое введение

Теоретическое введение, касающееся чистоты авиационных топлив, методов ее оценки и влияния различных видов загрязнений на работу узлов и агрегатов топливных систем ВС и АД, рассмотрено в лабораторной работе № 2. Взаимодействие авиатоплива с водой. Теоретическое введение, отражающее влияние наличия воды в авиационных топливах на работу узлов и агрегатов топливных систем ВС и АД, рассмотрено в лабораторная работа № 4. Определение загрязненности авиатоплив с помощью ИКТ на ПОЗ-Т.

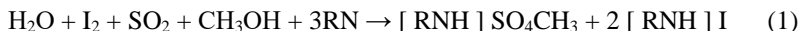
Данная лабораторная работа посвящена определению содержания воды в авиационных топливах в соответствии с ГОСТ 56340-2015.

Общий вид прибора представлен на рис. 1.

Сущность метода заключается в следующем. В кулонометрическом титраторе влаги, работающему по методу Карла-Фишера, вода вступает в реакцию с йодом и двуокисью серы в присутствии основания и спирта:



Рис. 1. Титратор MKS-520



При кулонометрическом методе титрования йод электролитически генерируется в анодном растворе, который содержит йодид-ионы:



До тех пор, пока в ячейке титрования присутствует вода, генерированный йод реагирует согласно (1). По мере того, как вся вода вступает в химическую реакцию, в анодном растворе появляется избыток йода. Этот йод определяется платиновым электродом, и образование йода прекращается. Согласно закону Фарадея количество образовавшегося (и затем прореагировавшего) йода пропорционально выработанному электрическому току. В уравнении (1)  $\text{I}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  реагируют друг с другом в пропорции 1 : 1.

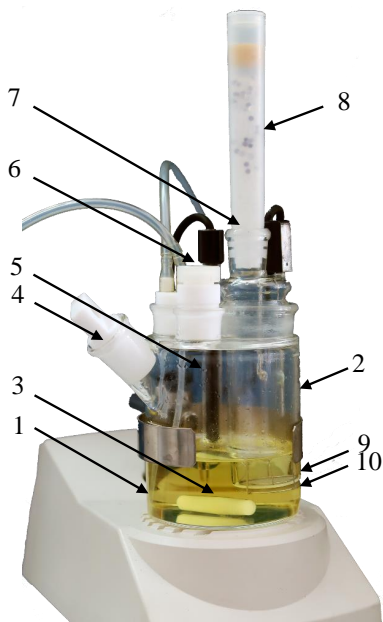
Поэтому моль воды (18 г) эквивалентен 2 x 96500 кулонов или 10,72 кулонов/1 мг H<sub>2</sub>O. Общее количество влаги, таким образом, может быть определено посредством измерения общего потребления электричества.

Метод был разработан немецким химиком Карлом Фишером в 1935 г. Основными достоинствами метода являются: высокая точность и воспроизводимость, малое количество образца, простота пробоподготовки, малое время анализа. Отрицательным является необходимость работы с ядовитыми веществами при подготовке растворов.

## 2. Экспериментальная часть

Перед проведением эксперимента очищают, сушат и собирают ячейки для титрования в соответствии с инструкцией изготовителя. Для герметизации от атмосферной влаги верхней и нижней ячейек аппаратуры используют фторуглеродную смазку. Подключают к титратору провода датчиков и электродов генератора.

Готовят (или используют) приготовленные (рис. 3) растворы для титрования и заполняют ячейки аппарата: через отверстие (4) заливают 100 мл анодного раствора, через отверстие (7) – 5 мл катодного раствора.



**Рис. 2.** Ячейки титрования MKS-520:

1 – анодная ячейка, 2 – катодная ячейка; 3 – магнитная мешалка; 4 – заливное отверстие для катода; 5 – платиновый детектирующий электрод; 6 – заливное отверстие с резиновой мембраной для ввода пробы топлива; 7 – заливное отверстие катода; 8 – заглушка, заполненная силикагелем; 9 – катод; 10 – анод



**Рис. 3.** Растворы для титрования: анодный (слева), катодный (справа)

### Порядок проведения эксперимента



Рис. 4. Введение пробы топлива

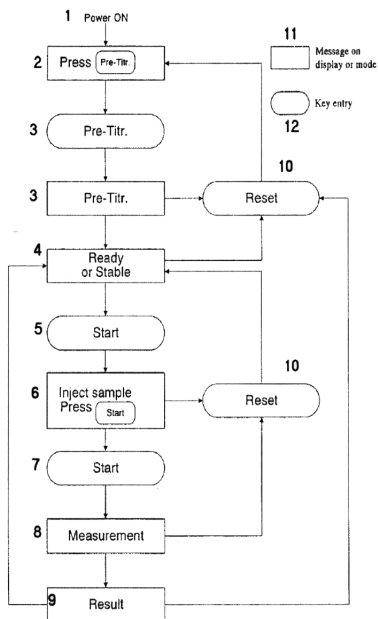


Рис. 5. Алгоритм задания команд при проведении эксперимента

- через отверстие (7) добавить 5 мл католита во внутреннюю (малую) ячейку, используя шприц (рис. 2). Для слива жидкости применяется промывочная бутылка для дренажа (рис. 1), также слив может осуществляться самотеком через заливное отверстие (7);

- через отверстие (4) заполнить внешнюю ячейку титрования (1) реактивом Фишера, используя резиновую грушу, в объеме 100 мл;

- аккуратно опустить во внешнюю ячейку магнитную мешалку (3);

- запустить предварительное титрование для устранения остаточной влаги в ячейке (кнопка Pre-titr);

- тщательно перемешать пробу топлива;

- набрать пробу в сухой чистый шприц и взвесить его с точностью до 0,1 мг,  $m_1$ ;

- ввести образец через мембрану анодной ячейки (6). Конец иглы при этом находится немного ниже поверхности жидкости (рис. 2, 4);

- запустить титрование в соответствии с алгоритмом (рис. 5);

- удалить шприц, вытереть иглу бумажным фильтром и взвесить с точностью до 0,1 мг,  $m_0$ ;

- ввести на устройстве значения масс шприца  $m_1$  и  $m_0$ ;

- записать показанный на мониторе титратора результат – значение количества воды в микрограммах;

- вычислить содержание воды в образце с точностью до 0,001% масс. по формуле:

$$X(H_2O) = \frac{46}{m_{T, \text{г}} \cdot 10000}, \% \text{ масс.}$$

Сделать вывод о проведенной работе.

### 3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение чистоте авиационных топлив. Какие требования к чистоте АТ предъявляются в эксплуатации?
2. Назовите фазовые состояния воды в АТ и в топливных системах ВС и АД.
3. Назовите способы определения воды в АТ.
4. Опишите сущность метода Карла Фишера для определения содержания воды в АТ.
5. Опишите прибор для определения содержания воды в АТ по методу Карла Фишера.
6. Опишите методику проведения эксперимента по определению содержания воды в АТ.
7. Назовите влияние обводненности АТ на эксплуатацию ВС и АД.
8. Назовите способы предотвращения негативных последствий, связанных с наличием воды в АТ и топливных системах ВС и АД.

## Лабораторная работа № 10. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ

Цель работы:

- изучить эксплуатационное свойство авиатоплив – электризацию;
- знать влияние электризации АТ на эксплуатацию ВС;
- уметь определять диэлектрическую проницаемость в соответствии с

ГОСТ 25950-83.

### 1. Теоретическое введение

*Электризация АТ – это процесс разделения и концентрации зарядов одного знака на границах раздела фаз, а противоположного знака – в объеме топлива.*

Чистое топливо является хорошим диэлектриком с низкой электропроводностью. В связи со способностью диэлектриков к поляризации, при определенных условиях (прежде всего вследствие трения) на границах раздела фаз топливо – твердое вещество образуются заряды статического электричества. Заряды сохраняются в материалах, обладающих низкой электропроводимостью, но также и в электропроводящих материалах, если они изолированы от земли. При накоплении значительного заряда и при разрыве контакта материалов может происходить искрообразование, способное вызвать воспламенение топливовоздушной смеси, что в значительной степени определяет пожарную безопасность при применении авиатоплив.

К показателям электризующих свойств топлив относятся: относительная диэлектрическая проницаемость и удельная электрическая проводимость.

*Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  является безразмерной и показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме:*

$$\epsilon = \frac{E_0}{E},$$

где  $E_0$  – модуль напряженности электрического поля в вакууме, Н/Кл,

$E$  – модуль напряженности электрического поля в диэлектрике, Н/Кл.

Значения диэлектрической проницаемости некоторых веществ показаны в табл. 1.

*Удельная электрическая проводимость – это проводимость объема раствора, заключенного между двумя параллельными электродами, имеющими площадь по  $1 \text{ м}^2$  и расположенными на расстоянии  $1 \text{ м}$  друг от друга. Является величиной, обратной удельному сопротивлению вещества:*

$$L = \frac{1}{\rho}, [\text{См/м}],$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом/м.

Ввиду малых значений  $L$ , ее размерность принято выражать в пСм/м ( $10^{-12}$  См/м). Значения удельных проводимостей некоторых веществ показаны в табл. 2.

Значения  $\varepsilon$  некоторых веществ и химических компонентов топлив

Вакуум	1	Компоненты топлив	
Воздух	1,0006	Ароматические углеводороды	1,8-2,5
Керосин	2	Галогензамещенные углеводороды	3-10
Бумага	2,2	Спирты и гидроксилсодержащие соединения	10-35
Дерево сухое	3	Карбоновые кислоты	2-10
Резина	4	Сложные эфиры	4-9
Алмаз	5,7	Альдегиды, кетоны	10-20
Ацетон	19,5	Амины	3-13
Вода	81		

Таблица 2

Удельная электропроводность некоторых веществ при 20 °С

Вещество	$L$ , пСм/м	$\rho$ , Ом/м	$\varepsilon$
Бензол	1-10	$10^{11}$ - $10^{12}$	2,3
Керосин (без антистатич. присадки)	0,1-100	$10^{10}$ - $10^{13}$	2,0
Ацетон	$10^7$ - $10^8$	$10^4$ - $10^5$	19,5
Дистиллированная вода	$10^8$ - $10^9$	$10^3$ - $10^4$	81,0

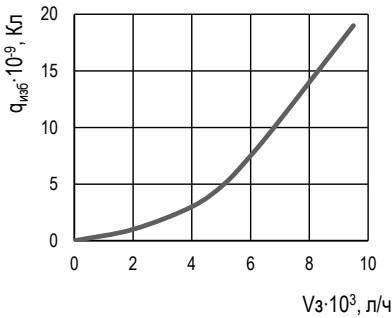
Указанными показателями характеризуется электризация АТ. Из основных углеводородов, входящих в состав топлив, наибольшей способностью к электризации обладают нафтеновые, затем ароматические, а самой низкой – парафиновые.

В связи со сложностью измерения диэлектрической проницаемости, в эксплуатации измеряют значения удельной электрической проводимости (УЭП). Соответственно, значения последнего показателя и нормируются в ГОСТ 10227-2013 для АТ. Для топлив без антистатической присадки значение УЭП не должно превышать 10 пСм/м. С антистатической присадкой должно быть не менее 50 и не более 600 пСм/м.

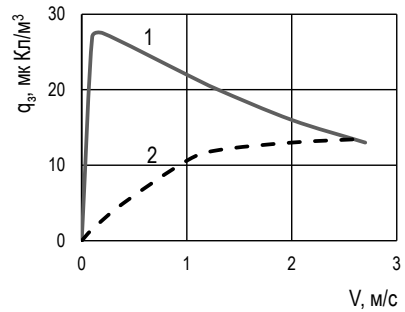
С увеличением УЭП электризация АТ (количество образующихся зарядов) снижается. Это объясняется тем, что с увеличением электропроводности топлива происходит стекание зарядов в землю.

*Факторами*, влияющими на электризацию авиатоплив, являются: углеводородный состав, скорость прокачки (рис. 1), площадь поверхности трения (рис. 2), загрязненность топлива, вязкость топлива (рис. 3), температура (рис. 4).

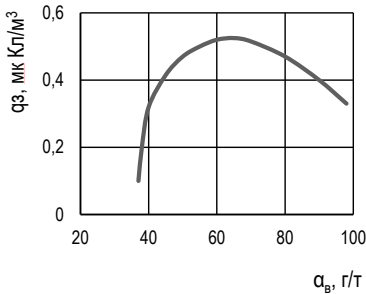




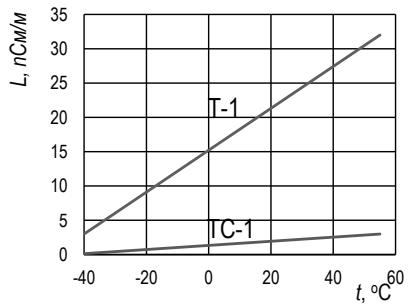
**Рис. 1.** Влияние скорости заправки на значение избыточного заряда в баке



**Рис. 2.** Зависимость плотности заряда, образовавшегося на фильтре (1) и трубе (2) от скорости течения топлива



**Рис. 3.** Влияние содержания воды в топливе на плотность заряда



**Рис. 4.** Зависимости электропроводности АТ от температуры

Таким образом, при осуществлении мероприятий по подготовке АТ к применению, наибольшая его электризация будет наблюдаться после фильтров, а также при прокачке по топливопроводным магистралям с высокими скоростями.

С целью снижения электризации АТ применяются антистатические присадки (Сигбол, ASA) и механические устройства ИНСЭТ (индукционные нейтрализаторы статического электричества). Присадки увеличивают электропроводность топлива, способствуя стеканию зарядов в землю. ИНСЭТ являются эффективным методом снижения электризации при наземной подготовке топлива, снижают плотность зарядов статического электричества непосредственно в потоке топлив и рекомендуются к установке после фильтров.

Для измерения удельной электропроводности авиационных топлив применяют приборы типа ЭЛ-4М (рис. 5).

В основе принципа действия прибора ЭЛ-4М лежит способ измерения силы тока, протекающего через жидкость, заполняющую зазор между

поверхностями измерительного электрода, погруженного в жидкость. Протекающий ток усиливается, преобразуется АЦП и отображается на цифровом табло. Показания цифрового табло соответствуют значению удельной электропроводности в пСм/м.



Рис. 5. Прибор ЭЛ-4М

## 2. Экспериментальная часть

Получить пробу авиационного керосина.

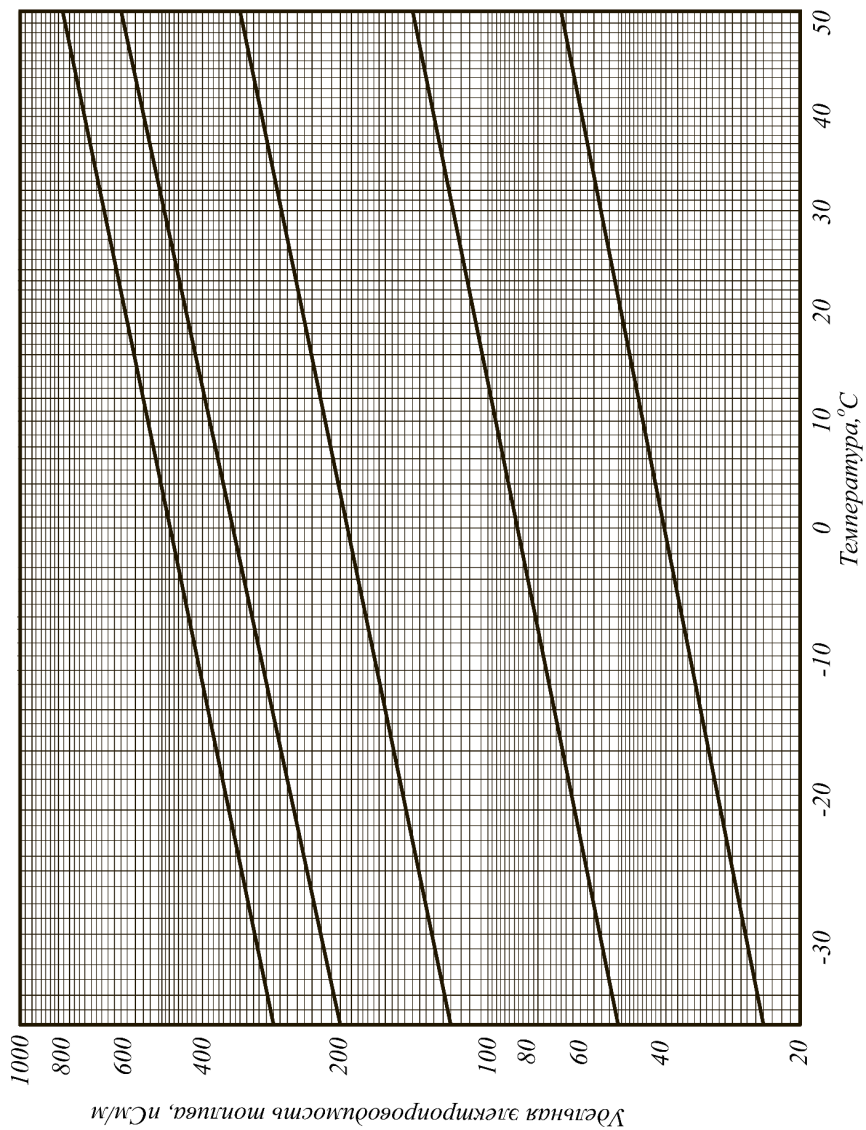
Порядок проведения измерения:

1. заземлить прибор;
2. опустить чувствительный элемент в топливо на требуемый уровень, не касаясь воды;
3. зафиксировать показания прибора и температуру измеряемого образца топлива;
4. при необходимости провести пересчет удельной проводимости в зависимости от температуры по диаграмме (рис. 6).

Сделать вывод о проведенной работе и пригодности АТ к применению на ВС.

## 3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение электризации топлив, назовите ее показатели.
2. Назовите факторы, влияющие на электризацию.
3. Назовите способы борьбы с электризацией топлив.
4. Назовите величины допустимых значений удельной электрической проводимости для реактивных топлив с антистатическими присадками и без них.
5. Опишите методику определения удельной электрической проводимости.
6. Назовите принцип действия антистатических присадок.



**Рис. 6.** Диаграмма пересчета измеренной электропроводности в зависимости от температуры

## Лабораторная работа № 11. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ НЕКОПТЯЩЕГО ПЛАМЕНИ АВИАЦИОННЫХ ТОПЛИВ

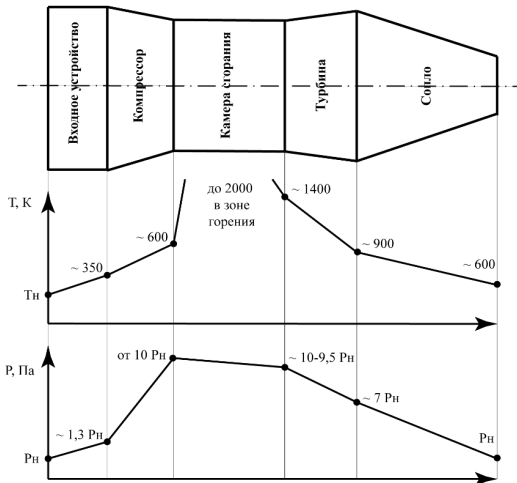
Цель работы:

- изучить эксплуатационное свойство авиатоплив – нагарообразование;
- знать влияние нагарообразования на эксплуатацию АД;
- уметь определять высоту некоптящего пламени авиатоплив в соответствии с ГОСТ 4338-91.

### 1. Теоретическое введение

В результате сгорания авиационных топлив образуются адгезионно активные аморфные или твердые отложения: сажа, зола, кокс и пр., в общем случае называемые *нагаром*, которые могут откладываться на конструктивных элементах авиационных двигателей, контактирующих с продуктами сгорания.

При распылении топлива каждая его частица, двигаясь по сложной траектории, испаряется пофракционно и нагревается до высокой температуры. Конечными остатками каждой частицы топлива являются механические примеси и нелетучие высокомолекулярные соединения, состоящие из смолистых компонентов топлива и соединений, образовавшихся за счет процессов окисления и пиролиза непосредственно в объеме частицы. Чем тоньше распыл топлива, тем меньше остаток каждой частицы, меньше его масса. Такие остатки уходят из двигателя как продукты сгорания. Но остатки крупных капель,



**Рис. 1.** Характер изменения параметров рабочего тела по воздушному тракту авиационных ГТД

имеющих значительную массу, преодолевая осевую аэродинамическую силу газовоздушного потока, могут достигать стенок камеры сгорания, а также откладываться на сопловом аппарате, лопатках турбин, сопле и пр. Такой высокоуглеродистый остаток при температурах от 773 К и выше находится в жидком состоянии. Температура же кристаллизации вещества остатка составляет ~ 573 К, поэтому при попадании на относительно холодные конструктивные элементы АД происходит его мгновенная кристаллизация

(изменение температуры и давления рабочего тела в авиационном ГТД представлено на рис. 1).

Кристаллизация вещества на холодной поверхности характеризуется очень высокой адгезией. Таким образом, вследствие неудовлетворительного распыла топлива или высокого содержания в топливе высокомолекулярных соединений или того и другого вместе взятых постепенно в зонах авиационного двигателя, начиная с камеры сгорания, образуются высокоуглеродистые отложения – нагары.

Нагар состоит в основном из 72...90 % углерода, 4,5...22,5 % кислорода и 1,3...3,6 % золы. Зольная часть нагара представляет собой смесь механических примесей топлива и соединений серы.

С увеличением содержания серы в топливе (с 0,05 до 0,2 %) количество золы в нагарах увеличивается в 9 раз, изменяется структура нагара, увеличивается его прочность.

Интенсивность отложений нагаров зависит от отношения в них  $C : O$ . Чем меньше это отношение, тем больше нагара образуется на форсунках реактивных двигателей в условиях полета. Объясняется эта связь более высокой адсорбируемостью на металлах углеродистых окисленных соединений.

Чаще всего нагары в ГТД наблюдаются на входящих в камеру сгорания кромках форсунок и завихрителя (аморфный сажеподобный нагар) и на конусной части камеры сгорания (кристаллический, коксообразный нагар, имеющий твердость  $HV \sim 40 \dots 60$  и прочность от 100 до 150 МПа).

*Нагарообразование в двигателях в значительной степени зависит от химического и фракционного составов топлива. Чем выше его плотность, больше содержание в нем гетероорганических соединений, фактических смол и ароматических углеводородов, значительнее отношение углерода к водороду, тем выше нагарообразование.*

*Образование нагаров приводит к ухудшению характеристик камеры сгорания: изменяется ее геометрия, увеличиваются гидравлические и термические сопротивления, ухудшаются полнота сгорания, стабильность и скорость горения топлива. Нагары, образующиеся на форсунках, могут перекрыть каналы для воздуха, охлаждающего форсунку, и сечение ее сопла, что ухудшает тонкость и равномерность распыла топлива или приводит к прекращению подачи топлива. Нагары затрудняют запуск двигателя, и не только из-за засорения форсунок, но и из-за замыкания электродов топливных свечей.*

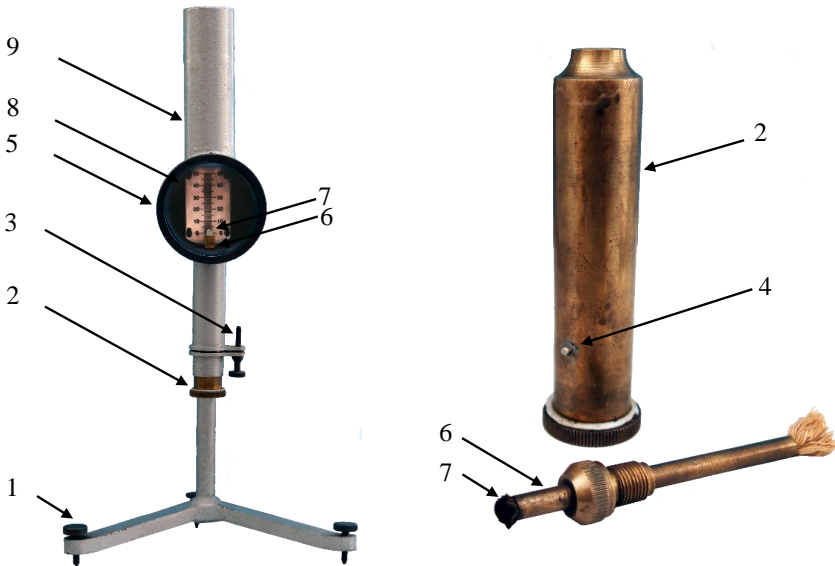
Нагары на конструктивных элементах откладываются неравномерно, а их толщина может достигать 10 см. Это приводит к возникновению температурного градиента в деталях, их местным перегревам вплоть до коробления или растрескивания. Части нагара, отрываясь от деталей, могут попадать в турбину.

При повышенных нагароотложениях в камерах сгорания расход топлива может увеличиваться на 2,8...7,7 %, а сила тяги уменьшаться на 0,1...3,2 %.

Учитывая значительное влияние нагаров на надежность и КПД работы двигателей, ресурс его конструктивных элементов, нагарообразующие

характеристики топлив нормируют *рядом показателей*. К ним относятся: содержание бициклических и моноциклических ароматических углеводородов; зольность (массовая доля золы, содержание в процентах негорючего (на безводную массу) остатка, который образуется из минеральных примесей топлива при его полном сгорании); коксуемость (образование остатка в виде угля (кокса), при нагревании нефтепродукта без доступа воздуха), люминометрическое число (показатель интенсивности излучения пламени при сгорании топлив) и высота некопящего пламени.

Одним из наиболее простых способов оценки нагарообразующих свойств АТ, является определение высоты некопящего пламени. **Максимальная высота некопящего пламени (МВНК)** – высота пламени (в миллиметрах), достигаемая до появления дыма, при сжигании топлива в стандартной лампе при определенных условиях.



**Рис. 2.** Лампа для определения высоты некопящего пламени

1 – упор, 2 – резервуар, 3 – регулировочный болт резервуара, 4 – упор резервуара, 5 – камера, 6 – фитильная трубка, 7 – фитиль, 8 – шкала, 9 – вытяжная труба.

Сущность метода заключается в измерении максимальной высоты некопящего пламени испытуемого топлива перед появлением дыма при его сжигании в закрытой лампе со шкалой (рис. 2). Для АТ ТС-1 и РТ значение МВНП должно быть не менее 25 мм.

## 2. Экспериментальная часть

Лампу размещают в вертикальном положении в помещении, полностью защищенном от сквозняков, и тщательно осматривают, следя за тем, чтобы все вентиляционные отверстия в камере и резервуаре были чистыми, незасоренными и имели требуемые размеры. Камера должна быть расположена таким образом, чтобы вентиляционные отверстия не были загорожены. Небольшие отклонения от всех перечисленных требований имеют значительное влияние на точность полученных результатов.

Фитили, как новые, так и оставшиеся от предыдущих испытаний, экстрагируют, проводя не менее 25 циклов экстракций, в экстракторе со смесью толуола и безводного метилового спирта в равных объемах, подсушивают в вытяжном шкафу или на сквозняке (или используют то и другое). Затем сушат в сушильном шкафу при температуре 100-110 °С в течение 30 мин и до использования хранят в эксикаторе.

### *Порядок проведения эксперимента*

- подготовленный фитиль (7) длиной не менее 125 мм пропитывают образцом и вставляют в фитильную трубку резервуара (6). Вращательные движения, связанные с этой операцией, следует проводить очень осторожно. Если фитиль закрутился, его осторожно раскручивают. Затем зажигаемый конец фитиля вновь смачивают пробой;

- в сухой чистый резервуар лампы (2) при комнатной температуре наливают 20 см<sup>3</sup> пробы АТ;

- фитильную трубку (6) вставляют в резервуар (2) и завинчивают. Необходимо проследить, чтобы вентиляционные отверстия в резервуаре были свободны от топлива. Обрезают фитиль горизонтально, так чтобы он выступал из трубки на 6 мм и не имел истершихся нитей. Для этого используют новое чистое лезвие, ножницы или другой острый режущий инструмент. Затем вставляют резервуар в лампу;

- болтом (3) регулируют положение верхнего конца фитильной трубки (6), чтобы он точно совпадал с нулевой отметкой на шкале (8);

- зажигают лампу, устанавливают высоту пламени около 10 мм и дают лампе гореть 5 мин;

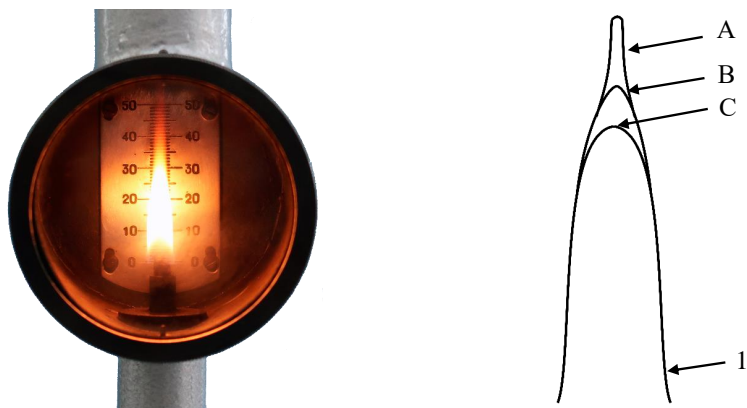
- поднимают резервуар до появления дыма (копоты), затем медленно опускают. При этом форма пламени меняется следующим образом (рис. 2):

- а) длинный язык пламени, дым едва виден, пламя подвижное и неустойчивое;

- б) пламя с удлинённым острым концом и вогнутыми сторонами (А);

- в) острый конец исчезает, язык пламени становится слегка закругленным (В). Иногда рядом с кончиком языка появляется зубчатое яркое пламя, которое в расчет не принимается;

- г) язык пламени с сильно закругленным концом (С);



**Рис. 2.** Регистрация максимальной высоты некопящего пламени

A – слишком высокое, B – нормальное, C – слишком низкое, 1 – основание пламени

- измеряют высоту пламени B (рис. 2) с точностью до 0,5 мм. Записывают отмеченную высоту некопящего пламени. Чтобы избежать погрешностей в результате, глаз наблюдателя должен находиться слегка в стороне от центральной линии, так чтобы отражение пламени было видно на шкале по одну сторону от вертикальной центральной линии, а само пламя находилось по другую сторону шкалы. Показание шкалы в обоих случаях должно быть одинаковым;

- проводят три отдельных наблюдения высоты некопящего пламени, повторяя последовательность возникновения пламени. Если эти результаты будут отличаться друг от друга более чем на 1,0 мм, повторяют испытание на новой пробе и с другим фитилем;

Вынимают резервуар из лампы, промывают растворителем и продувают воздухом. Делают вывод о проведенной работе о кондиционности пробы авиационного топлива.

### 3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение нагарообразующим свойствам АТ.
2. Назовите факторы, влияющие на нагарообразующие свойства топлив.
3. Назовите способы оценки нагарообразующих свойств АТ.
4. Назовите влияние нагарообразующих свойств на эксплуатацию АД.
5. Опишите процесс нагарообразования в АД.
6. Опишите установку и сущность метода определения высоты некопящего пламени.
7. Опишите методику определения высоты некопящего пламени АТ соответствии с ГОСТ 4338-91.