

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

КОФ.ЭЭПАИД

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ  
ПРОДУКТОВ ИЗНОСА  
В МОТОРНЫХ МАСЛАХ  
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
методических указаний  
к лабораторной работе  
для студентов

Составители: Б. А. Углов, И. М. Макаровский

УДК 621.452.3 (075)

**Определение содержания продуктов износа в моторных маслах авиационных двигателей: Метод. указания /Сост. Б. А. Углов, И. М. Макаровский; Куйбыш. авиац. ин-т. Куйбышев. 1990. 35 с.**

Изложены основные методы определения концентрации продуктов износа в моторных маслах авиационных двигателей с использованием стилоскопа СЛ-11, рентгеновского бездифракционного анализатора БАРС-3 и прибора ПОЖ-М.

Указания предназначены для студентов, изучающих специальность «Техническая эксплуатация летательных аппаратов».

Рецензенты: В. А. Хитов, В. Т. Анискин

## **ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Целью работы является изучение некоторых современных методов оценки состава и характера загрязнений с помощью серийных приборов, применяемых в авиационных подразделениях.

Комплекс лабораторных работ с общим названием «Определение содержания продуктов износа в моторных маслах авиационных двигателей» состоит из трех самостоятельных работ:

определение содержания продуктов износа в моторных маслах двигателей с использованием визуального эмиссионно-спектрального (ВЭС) метода (на основе стилоскопа СЛ-11);

определение концентрации продуктов износа в смазочных маслах двигателей с использованием рентгеновского бездифракционного анализатора БАРС-3

определение содержания железа в моторном масле дифференциально-магнитным методом (с помощью прибора ПОЖ-М).

Каждая работа выполняется в следующей последовательности:

1. Изучают теоретические основы работы.
2. Рассматривают физическую сущность метода и принцип работы аппаратуры.
3. Изучают методики определения продуктов износа в масле.
4. Определяют содержание продуктов износа в пробе масла.
5. Делают выводы по работе.
6. Оформляют отчет.

## **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

### **1. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МАСЕЛ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Свежее авиационное минеральное масло, используемое для двигателей, имеет коричневый цвет с желтым или зеленым оттенком. В процессе эксплуатации под влиянием образующихся при окислении смол и осадков, а так-

же механических загрязнений масло приобретает темный, черно-коричневый цвет. Подобное изменение внешних признаков происходит в процессе работы и синтетических масел.

Свойства свежего масла резко изменяются в первые часы работы двигателя — в нем интенсивно протекают процессы окислительной полимеризации при высоких температурах (т. е. образовании углеводородных макромолекул с участием кислорода, растворенного в масле воздуха), в результате которых образуются асфальтены, смолы, органические кислоты и др. Часть таких образований выпадает из масла в виде лаковой пленки на деталях двигателя и тем самым уменьшает каталитическое действие металлов на процессы окисления. Все это приводит к увеличению вязкости масла, уменьшению его прокачиваемости и теплосъему с трущихся поверхностей, ухудшению смазывающих свойств, заеданию и заклиниванию подвижных сочленений.

Скорость изменения качества масла (его эксплуатационных свойств) и, следовательно, срок его службы определяются состоянием двигателя, качеством свежего масла и условиями эксплуатации двигателя, от которых зависит степень загрязнения масла механическими примесями. Изменение свойств масел, кроме того, обусловлено испарением легких фракций, накоплением в них пыли из атмосферы, продуктов износа и металлических примесей, воды и каталитическим действием различных металлов. Попадание в масло абразивных частиц во много раз увеличивает износ сопряженных поверхностей деталей. В присутствии загрязнений возрастает способность масла к пенообразованию. Происходит изменение некоторых свойств масел в зависимости от наработки (рис. 1...3). Характер изменения концентрации продуктов износа в масле в зависимости от наработки приведен на рис. 4...5.

Экспериментально установлено, что процесс износа состоит из трех различных стадий.

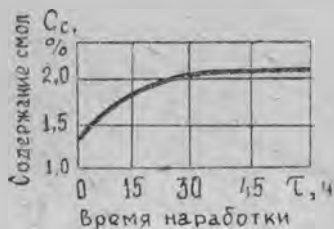


Рис. 1. Изменение содержания смол в масле в зависимости от наработки поршневого двигателя



Рис. 2. Изменение вязкости масла МК-8 в процессе его работы в ТРД

Первая стадия (зона I на рис. 4) — приработка трущихся поверхностей, характеризуется значительным количеством металлических частиц размером 5...10 мкм, постепенным по времени наработки уменьшением скорости накопления продуктов износа в масле и относительного содержания крупных частиц, т. е. уменьшением показателя  $n = q_v/q_n$ , где  $q_v$  — количество металла, осевшего на верхней части,  $q_n$  — на нижней части многослойного фильтра. Завершение этой стадии определяется по стабилизации выноса продуктов износа из зоны трения. Этот процесс обычно заканчивается в ходе контрольно-сдаточных испытаний.



Рис. 3. Изменение содержания механических примесей в масле в процессе работы двигателя



Рис. 4. Изменение концентрации продуктов износа (пунктирная линия) и интенсивности износа (сплошная линия); 1 — масло с удовлетворительными эксплуатационными свойствами (ЭС); 2 — масло с ухудшенными ЭС; I — приработка; II — нормальная работа; III — интенсивный износ, обусловленный разрушением элементов двигателя

Вторая стадия (зона II на рис. 4) соответствует нормальной работе узлов трения с монотонным процессом износа и накоплением в масле продуктов износа. Стадия характеризуется относительно постоянными значениями величины  $q_v$ ,  $q_n$  и  $n$ , зависящих от условий работы деталей, качества и периодичности замены масла (рис. 5). Эта стадия в большинстве случаев занимает 90% общего срока службы узлов трения.

Третья стадия (зона III на рис. 4) характеризуется быстрым увеличением интенсивности износа и накопления металлических частиц в масле с преобладанием частиц крупных размеров (10...30 мкм). На этой стадии возможно быстрое разрушение узлов трения, в том числе и во время полета.



Рис. 5. Изменение концентрации продуктов износа в масле с ухудшенными эксплуатационными свойствами при доле свежего масла (точки А и Б)

При появлении в масле крупных частиц железа, меди или любых количеств магния и алюминия проводится анализ возможных причин их появления. После тщательного осмотра двигателя заменяют масло в системе, двигатель запускают и опробуют с последующей проверкой масла на содержание металлических примесей. Если установлено, что их появление является следствием разрушения отдельных деталей или узлов, двигатель к дальнейшей эксплуатации не допускается.

Аналогичные изменения в работе сопряженных пар наблюдаются в среде других рабочих жидкостей — масел в гидравлических и керосинов в топливных системах летательных аппаратов.

Таким образом, масло, циркулирующее в работающем двигателе, является носителем информации об интенсивности и степени износа его деталей.

## 2. ОЦЕНКА ЧИСТОТЫ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Обеспечение требований безопасности, экономичности и регулярности полетов, надежности и долговечности авиационной техники во многом зависит от чистоты рабочих жидкостей — моторных и гидравлических масел и топлив. Объективный контроль уровня загрязнений механическими примесями — сложная метрологическая проблема, поскольку такую комплексную физико-химическую систему, как загрязненное масло, охарактеризовать в достаточной степени одним-двумя параметрами невозможно.

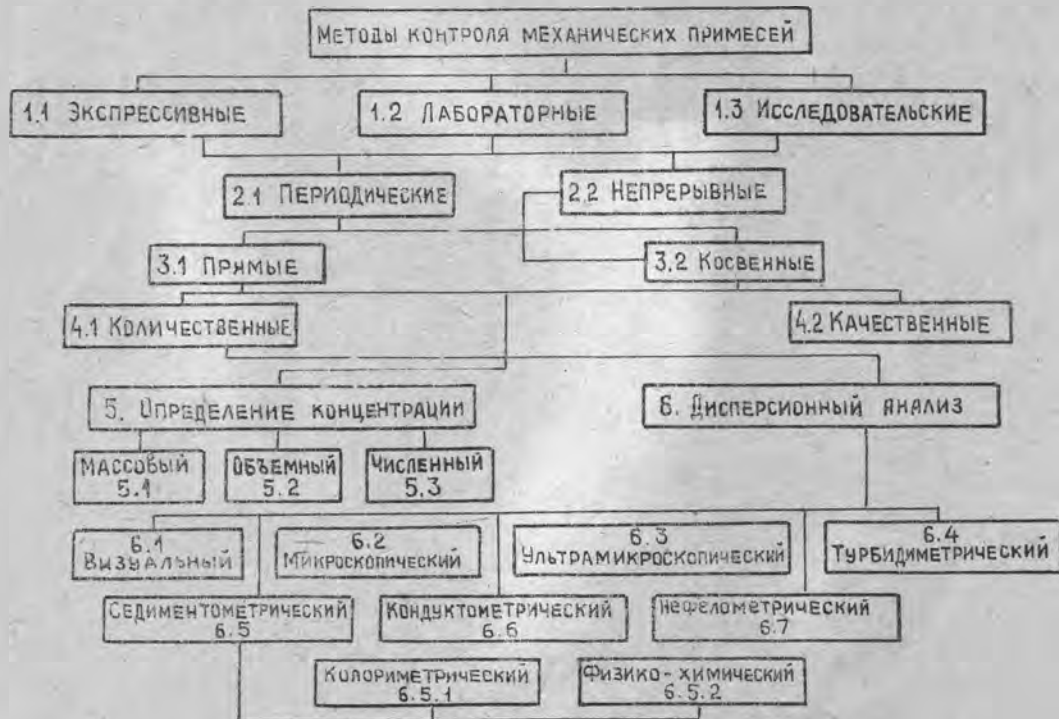


Рис. 6. Укрупненная классификация методов контроля механических примесей

Укрупненная классификация методов контроля содержания механических примесей приведена на рис. 6. В основу классификации положены обобщенные направления методов контроля и их взаимосвязь.

В зависимости от цели методы контроля подразделяются на экспрессивные (оценочные), лабораторные и исследовательские. Экспрессивные (экспресс-методы) применяются для контроля чистоты рабочей жидкости в процессе эксплуатации авиационной техники; лабораторные методы используются в подразделениях ГСМ; исследовательские — в научно-исследовательских и летно-испытательных организациях. Все эти методы могут быть периодическими (анализу подвергаются небольшие объемы, периодически сливаемые из рабочих емкостей двигателей — разовый контроль) и непрерывными — в процессе работы техники на стендах или в условиях эксплуатации.

Методы периодического контроля могут быть прямыми и косвенными. Прямые (весовые) методы выполняются с помощью различных способов фильтрации, сепарирования, седиментометрирования (осаждения) с последующим взвешиванием твердой фракции. Косвенные методы основываются на физико-химических явлениях, позволяющих выявлять массу, количество, размеры частиц. Методы непрерывного анализа являются косвенными, тарировка аппаратуры в них осуществляется прямыми методами. Все перечисленные методы могут быть количественными или качественными — последние устанавливают наличие или отсутствие механических примесей.

Результаты анализа рабочих жидкостей перечисленными методами могут быть представлены значениями массы всей дисперсной фазы (валовый анализ) и гранулометрической характеристикой механических примесей.

Широкий класс современных приборов позволяет определить массовую, объемную и численную концентрацию механических примесей, производить дисперсионный анализ визуально (при этом фиксируются частицы размером более 20...30 мкм), с использованием оптического микроскопа с различной степенью увеличения, ультрамикроскопа, по изменению интенсивности проходящего через образец дисперсионной системы светового потока (турбидиметрия) или по рассеянию света дисперсионной системой (нефелометрия). Седиментационный анализ загрязнений рабочих жидкостей позволяет весовым или оптическим способом определять количество частиц. Коудуктометрический метод основан на изменении электропроводности смеси диспергированных частиц и среды, в которой они распределены. Подробнее эти вопросы изложены в учебном пособии Л. Г. Ключарева «Чистота авиационных топлив, ма-



сел и специальных жидкостей и ее контроль» (Куйбышев: КуАИ, 1983. 75 с.).

Для диагностирования систем и оценки чистоты рабочих жидкостей в выполненных конструкциях двигателей и ЛА в лабораториях ГСМ в настоящее время наиболее широко применяются: обнаружение и улавливание механических примесей с помощью фильтров, магнитных пробок, фильтров-сигнализаторов (срабатывающих при замыкании электродов частицами металла), анализ изменения вязкости жидкости, регистрация рассеивания и ослабления света при прохождении его через поток рабочей жидкости, спектральный анализ, анализ характеристического рентгеновского излучения химических элементов, входящих в состав загрязнений, и другие методы.

### Лабораторная работа 1

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА В МОТОРНЫХ МАСЛАХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОГО ЭМИССИОННО- СПЕКТРАЛЬНОГО (ВЭС) МЕТОДА ( НА ОСНОВЕ СТИЛОСКОПА СЛ-11)**

### 1. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ВЭС-МЕТОДА

Метод позволяет (с учетом методики повышения его чувствительности, разработанной на кафедре ЭЛАНД КуАИ) проводить спектральный анализ моторных, гидравлических масел и топлив, подвергшихся механическим, тепловым и другим воздействиям в процессе эксплуатации авиационной техники.

В основу метода положена возможность оценки химического состава вещества, приведенного в состояние свечения (эмиссии квантов видимого света). По приведенной на рис. 6 классификации методов контроля механических примесей ВЭС метод относится к направлениям 1.2. (1.3), 2.1, 3.2, 4.1, 5.1. Вещество, нагретое до высокой температуры (5000...40000°С) и находящееся в парообразном состоянии, испускает свойственное только ему характеристическое излучение.

Для оценки химического состава вещества по параметрам излучения используются специальные оптические приборы (спектроскопы) и методики анализа. Излучения вещества наблюдаются в виде линейчатого спектра, т. е. в виде совокупности светящихся линий различного цвета и интенсивности. На определении спектрального состава по яркости линий спектра основаны все методы спектрального анализа, различающиеся способами возбуждения и

регистрации спектров, диапазоном волн наблюдаемых линий, аппаратурой, используемой для проведения анализа, и др.

Для приведения вещества в состояние эмиссии света в ВЭС-методе чаще используется дуговой разряд, реже низко- или высоковольтный разряд электричества. В дуге металл электродов (одним из которых является исследуемый образец) плавится, затем испаряется и поступает в зону электрического разряда. В облаке перегретых паров атомы и молекулы вещества излучают свет в широком диапазоне длин волн (2000...6000 Å).

Наблюдая спектр, можно определить химический состав исследуемого вещества и оценить содержание примесей по яркости их спектральных линий. Чем больше содержание примесей, тем интенсивнее (до известных пределов) линии спектра. Само появление определенных линий в спектре служит указанием на наличие примеси конкретного элемента определенной концентрации в исследуемом веществе. Оценивая интенсивность (яркость) линий, можно судить о количестве содержания примеси. Например, линия железа (4378,2 Å) в спектре меди появляется только при концентрациях более 0,05%.

В спектральном анализе широкое распространение получил термин «полуколичественный анализ», под которым понимается совокупность методов, позволяющих производить количественные определения содержания примесей по дискретной и сравнительно грубой шкале концентраций: 0,1, 0,3, 0,5, 1,0% и т. д.

При полуколичественном анализе нельзя ограничиться одной линией определяемого элемента в спектре, как это имеет место при качественном и количественном анализах. Для оценки интенсивности линий примеси при этом используется несколько известных линий, яркость которых принимается за условный внутренний стандарт.

Способ относительной оценки интенсивности линий лежит в основе количественного и полуколичественного анализа и известен под названием метода «гомологических пар» или «внутренних стандартов». Внутренним стандартом, т. е. линией сравнения, является линия основы сплава или постоянного электрода (медь, железо). Сравнивая интенсивность линий определяемого элемента и линий основы, можно получить объективную информацию о концентрации примесей вне зависимости от влияния внешних факторов. Наиболее достоверный результат измерения концентрации можно получить в случае равенства яркостей аналитических линий.

Менее четкие, но достаточно достоверные результаты можно получить путем сравнения линий определяемого элемента со специально подобранными по интенсивности линиями основы (полуколичественный анализ). Задача подбора гомологических пар и

аналитических признаков для спектральных определений является самостоятельной научной задачей, решение которой во многих случаях связано с проведением специальных исследований.

Методика количественных определений существенно упрощается при использовании спектральных приборов, оснащенных фотометрическими устройствами, позволяющими сравнивать интенсивности аналитических линий. В этом случае достаточно выбрать одну чувствительную линию определяемого элемента и линию внутреннего уравнивания интенсивности (яркости) аналитических линий сравнения и искомого элемента. По показаниям шкалы клина и градуировочным графикам, построенным с использованием спектральных эталонов, определяется концентрация примесей в веществе.

Фотометрический клин имеет равномерный градиент плотности, что позволяет получить линейные градуировочные зависимости.

С использованием ВЭС-метода можно анализировать состав веществ, находящихся в твердом, порошкообразном и жидком состояниях. При этом изменяется только способ ввода исследуемого вещества в пламя дуги. Если анализируемый образец находится в твердом состоянии и является проводником электрического тока, он используется в качестве одного из электродов. Для ввода порошкообразных проб и растворов применяются специальные электроды: трубки, диски, распылители или производится брикетирование вещества с токопроводящими порошками (медь, железо, графит).

## **2. МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЭС-МЕТОДА**

Сложность применения ВЭС-метода для определения содержания механических примесей в моторном масле заключается в относительно низкой чувствительности его. Так, например, содержание железа в медном образце может быть определено начиная с 0,1 %, магния — с 0,01%. В то же время отличительной особенностью ВЭС-метода является высокая оперативность проведения анализов — пять...семь минут на два...три элемента, низкие требования к качеству аппаратуры, простота и доступность методик.

Определение содержания продуктов износа с применением ВЭС-метода производится с использованием серийных спектральных приборов: стилоскопов типа СЛ-11, стилосметров типа СТ-7 и др. Оно может носить качественный, количественный или полуква­ли­тативный характер. Выбор методики анализа определяется поставленной диагностической задачей, возможностями имеющейся аппаратуры и квалификацией оператора.

Процесс обогащения пробы масла, значительно повышающий чувствительность ВЭС-метода, осуществляется несколькими способами: испарением, экстракцией, ионным обменом, осаждением на коллекторе, электромеханическим осаждением, озолением и др. При анализе веществ, состоящих из органических соединений, высокая степень обогащения по минеральным (металлы, окислы и т. п.) примесям достигается озолением фильтров. Трудоемкость анализа пробы масла по двум элементам (например, железо, магний) при этом не превышает 15 минут, а погрешность составляет около 10%. Количественные оценки содержания железа в масле при обогащении пробы возможны, начиная с концентрации 0,0001% (1 г/т), а магния — с 0,00001% (0,1 г/т).

Процесс обогащения пробы масла состоит из следующих операций:

перенесение информации из пробы масла на фильтровальную бумагу;

озоление (сжигание) фильтра;

приготовление аналитического концентрата (брикетирование).

Фильтрация масла производится на вакуумной установке с использованием беззольных фильтров. При этом механические частицы, содержащиеся в пробе масла ( $50...100 \text{ см}^3$ ), осаждаются на фильтре. Озоление производится путем сжигания фильтра над специальным сосудом, в котором производится смешение его с чистым порошкообразным наполнителем (медь, железо, графит, серебро). В результате сжигания образуется сухой остаток (около 6 мг), содержащий окислы продуктов износа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и др. Аналитический концентрат приготавливается путем брикетирования полученной смеси.

### 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе используется серийный стилоскоп СЛ-11 («Спектр»), имеющий автоколлимационную оптическую систему и фотометрическое устройство (оптический клин), позволяющее производить количественный или полуколичественный анализ. Прибор снабжается универсальным генератором, способным поддерживать стабильные режимы работы дуги, низко- или высоковольтной искры и в широких пределах поддерживать и регулировать параметры питающего тока (полярный, переменный с введением дополнительных емкостей и индуктивностей, со сдвигом по фазе, с различным числом импульсов и др.).

Прибор имеет два сменных окуляра ( $13,5\times$ ,  $20\times$ ), позволяющих изменять поле зрения наблюдателя и разрешающую способность оптической системы стилоскопа.

Фотометрический клин представляет собой узкую полоску пла-

тинового слоя меняющейся плотности, нанесенную на стеклянную пластинку, установленную за окуляром. На этой же пластинке нанесена шкала с делениями, проградуированная в процентах интенсивности пропускаемого светового потока (от 3 до 95%).

Оптическая часть прибора 1 (рис. 7) выполнена заодно с коммутирующей частью генератора 2. Силовая часть генератора 3 выполнена в виде отдельного блока, соединенного с коммутирующей

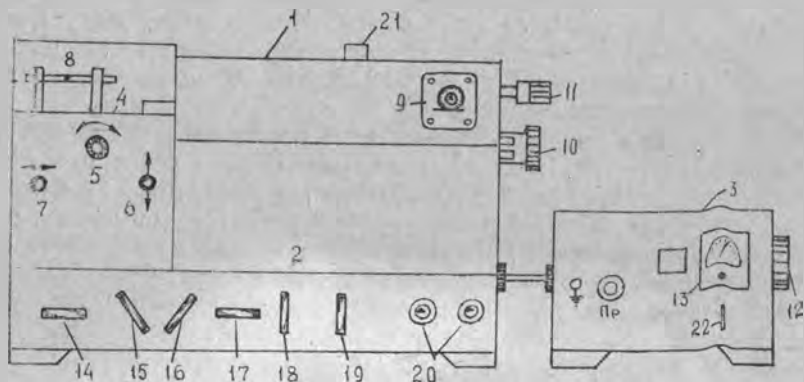


Рис. 7. Передняя панель стилоскопа СЛ-11: 1 — оптическая часть прибора; 2 — коммутирующая часть генератора; 3 — силовая часть генератора; 4 — столик для образцов; 5 — маховичок дискового электрода; 6 — смещение электрода по высоте; 7 — смещение электрода по горизонтали; 8 — держатель верхнего электрода; 9 — окуляр; 10 — смещение спектра; 11 — перемещение фотометрического клина; 12 — корректировка тока; 13 — амперметр; 14, 19 — регулировка параметров горения дуги; 20 — выключатель стилоскопа; 21 — фокусировка входной линзы; 22 — ток дуги (грубо)

частью быстроразъемными соединениями (ШР). С левой стороны оптической части расположен столик 4 с крышкой для установки образцов. Под столиком установлен кронштейн с держателем, который устанавливается стержневой или дисковый постоянный электрод. Дисковый электрод поворачивается маховичком 5, чем исключается необходимость частой зачистки электрода. Маховичком 6 нижний электрод смещается по высоте на  $\pm 10$  мм, а маховичком 7 — по горизонтали на  $\pm 8$  мм. Верхний электрод для крепления мелких образцов имеет стойку 8 с зажимом.

При работе с прибором регулировка осветительной системы требуется. Спектр рассматривается через сменный окуляр 9. Поворот диспергирующей призмы для выбора аналитического участка спектра производится маховичком 10, который имеет равномерную шкалу с ценой деления  $2^\circ$  и шкалу с указанием чувствительных линий некоторых химических элементов. При его повороте

происходит смещение спектра в поле зрения окуляра и автоматически поддерживается фокусировка изображения.

Фотометрический клин виден в центре поля зрения окуляра в виде узкой темной вертикальной полосы на фоне свечения спектральных линий. Линия, которую необходимо ослабить, маховичком 10 подводится под полосу фотометрического клина. Маховичком 11 производится перемещение клина до выравнивания яркостей аналитических линий. На шкале, видимой в правой стороне поля зрения, отсчитываются результаты фотометрирования. После снятия показаний маховичком 11 фотометрический клин поворачивается до совмещения рисок  $13,5\times$  или  $20\times$  в зависимости от кратности увеличения окуляра.

Корректировка питающего дугу тока производится маховичком 12 по амперметру 13. Выбор параметров горения источника света осуществляется ручками 14...19. Поворотом маховичка 21 изменяется фокусировка входной линзы, чем достигается повышение разрешающей способности оптической части, но одновременно заметно снижается интенсивность свечения линий спектра.

В комплект вспомогательного оборудования лабораторной установки входят:

вакуумная установка для фильтрации масла (рис. 8);

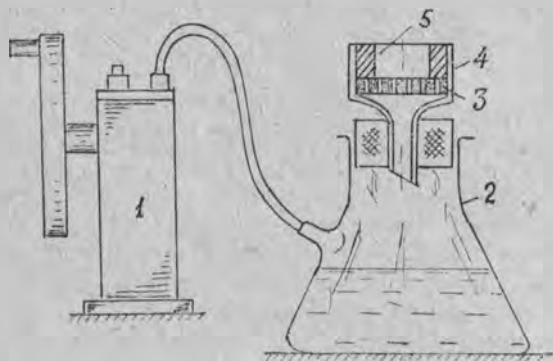


Рис. 8. Вакуумная установка для фильтрации масла: 1 — насос Камовского; 2 — колба; 3 — фильтрующий элемент; 4 — воронка; 5 — прижимной груз

пресс с формирующим приспособлением;  
верхний электрод с устройством зажима исследуемых брикетов, выполненный из спектрально чистой меди;  
бумажные обеззоленные фильтры («синяя», «желтая» и «крас-

ная» ленты, соответствующие ТУ6-09-1678-77 или «*Filtrak*» — производства ГДР);

- аналитические весы АВП-1 с точностью взвешивания  $\pm 0,1$  мг;
- медный спектрально чистый порошок с дисперсностью частиц до 100 мкм;
- различная химическая посуда.

#### 4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работы, связанные с выполнением спектральных исследований, требуют большой аккуратности и идентичности выполнения всех операций. Определение содержания продуктов износа в масле проводится в следующей последовательности:

1. Постановка задачи.
2. Выбор аналитических спектральных линий.
3. Изготовление аналитических концентратов (брикетов).
4. Подготовка прибора и оборудования.
5. Проведение спектральных исследований.
6. Обработка результатов исследований.
7. Заключение по результатам исследований.

*При постановке задачи* важно отчетливо установить, какие элементы необходимо найти, в каком количестве и в каких пробах (тип масла, объем пробы и т. п.). Требования к точности определений обуславливают выбор той или иной методики — количественного или полуколичественного анализа. Если погрешность определений не превышает  $\pm 10\%$ , анализы производятся на стилоскопе СЛ-11 с использованием фотометрического клина. Если можно ограничиться полуколичественной оценкой ( $C_{\max} \geq C \geq C_{\min}$ ), то целесообразно использовать методику полуколичественного анализа. Например, применительно к задачам диагностирования одного из изделий необходимо определить содержание магния и железа в масле ИМП-10. При анализе необходимо количественно определить концентрации указанных элементов в пределах от 1 до 10 г/т с точностью не менее  $\pm 10\%$ .

*Выбор аналитических спектральных линий* производится с использованием собственного опыта оператора и имеющимися литературными данными. Важно, чтобы аналитические линии определяемого элемента и линии сравнения лежали в доступной для наблюдения области спектра (лучше зелено-желтой) с близким потенциалом возбуждения. В нашем примере для определения содержания магния удобно использовать пару линий: Mg 5183 Å — Cu 5153 Å, а для железа: Fe 5969 Å — Cu 5153 Å, получаемых при питании дуги током 2А по простой схеме возбуждения.

*В процессе изготовления аналитических концентратов* готовится 100 см<sup>3</sup> смеси исследуемого масла с керосином в соотно-

шени 1 : 1. С помощью вакуумной установки производится фильтрация смеси. Для максимального удаления масла через этот же фильтр пропускается 50 см<sup>3</sup> керосина. Фильтр снимается пинцетом, просушивается в струе теплого воздуха и сжигается над чистой фарфоровой чашечкой. Пепел тщательно перемешивается с навеской 100 мг порошка меди.

Полученная смесь засыпается в матрицу и опрессовывается легкими ударами молотка или на гидравлическом прессе давлением менее 50 кг/см<sup>2</sup>. Полученный брикет должен иметь твердую консистенцию, блестящие поверхности и длину 3...4 мм.

Брикет закрепляется в держателе и устанавливается в качестве верхнего электрода в стилоскопе.

*Подготовку стилоскопа* необходимо вести в следующей последовательности:

подключить прибор к сети питания;

отрегулировать режим работы источника света, для чего:

установить на кронштейн держателя, расположенный под столиком 4 (рис. 7), постоянный электрод в виде медного диска, предварительно зачищенного на абразивном круге;

ручки на передней панели прибора перевести в положения, соответствующие режиму ДУГОВОЙ РАЗРЯД; ручка 14 «Полярность» — выкл.; ручка 15 «Комбинированный разряд» — 1; ручка 16 «Индуктивность» — 0; ручка 17 «Емкость» — 0; ручка 18 — «Фаза» — 90°; ручка 19 «Количество импульсов» — 2; ручка 24 «Ток дуги» на минимум; ручка 22 «Ток дуги» (грубо) — 5А;

установить на предметный столик 4 калибр (из принадлежностей стилоскопа), соответствующий зазору 2 мм; отрегулировать зазор между поверхностью столика и дисковым электродом вращением маховичка 6, снять калибр и установить на его место плоский образец, изготовленный из спектрально чистой меди;

установить в тубус спектральной части 9 окуляр с увеличением 20<sup>x</sup>; ручку 21 «Фокусировка объектива» установить в положение 1, маховичок 11 «Фотометрический клин» — в положение 20<sup>x</sup>, маховичок 2 «Выбор спектра» в положение линии  $\text{Cu } 5106 \text{ \AA}$  (около 104 делений шкалы);

нажатием кнопки 20 «Пуск» подать питание на электроды и вращением маховичка 12 по амперметру 13 отрегулировать ток дуги, равный 2А;

наблюдая через окуляр яркие зеленые линии спектра меди, произвести фокусировку окуляра, затем маховичком 7 добиться их максимальной яркости;

после настройки стилоскопа отключить питание дуги нажатием кнопки 20 выключателя СТОП.

*Проведение спектральных исследований* осуществляется следующим образом. Поворотом стойки верхнего электрода исследуе-



мый брикет устанавливается над торцом нижнего дискового электрода. Кнопкой 20 ПУСК включается стилоскоп и вращением маховичка 10 находитя нужная область спектра — при исследовании на содержание железа около 110 делений по шкале маховичка. Интересующая нас область легко отыскивается по группе ярких зеленых линий меди (рис. 9). Аналитической линией железа слу-

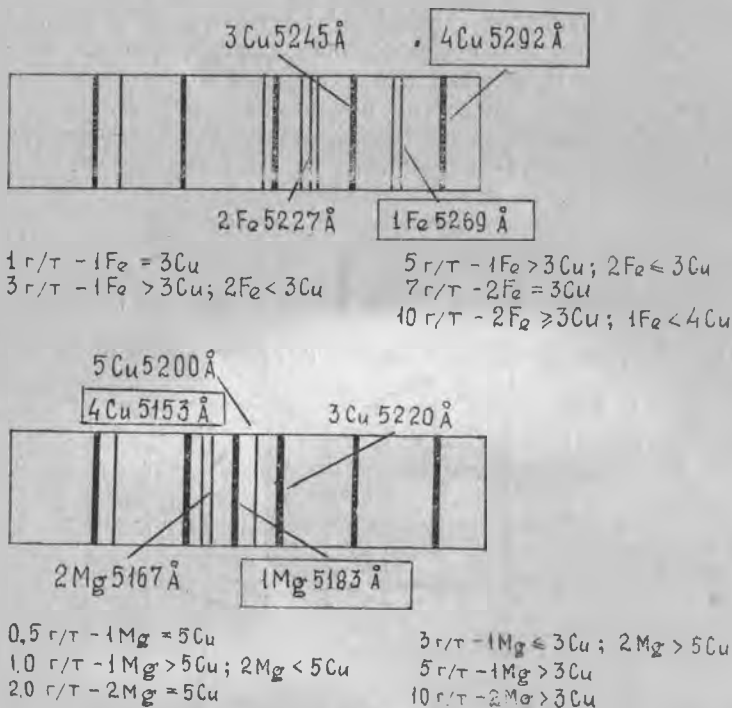


Рис. 9. Группы линий и спектральные признаки для определения концентрации железа (верхний рисунок) и магния (нижний рисунок)

жит последняя, наиболее яркая линия 1 Fe 5269 Å, а линией сравнения 4 Cu 5292 Å. Затем поворотом маховичка 11 в поле зрения вводится фотометрический клин, который путем вращения ручки 10 через 15...20 с горения дуги совмещается с линией 4 Cu 5292 Å. Положение маховичка 10 фиксируется по шкале и регистрируется в журнале наблюдений. Изменив положение фотометрического клина, повторяют эту работу два...три раза. Аналогичные наблюдения проводятся при определении концентрации магния и других элементов. Линии магния находятся в

той же области спектра (рис. 9 — нижний). Линия  $1 \text{ Mg } 5183 \text{ \AA}$  (около 106 делений шкалы маховичка) служит аналитической, а линия  $4 \text{ Si } 5153 \text{ \AA}$  — линией сравнения. Как и в предыдущем случае, выполняется несколько замеров с помощью фотометрического клина.

При обработке результатов исследований важнейшими факторами, приводящими к появлению ошибок, являются: неоднородность состава брикетов, нестабильность условий горения дуги, непостоянство межэлектродного промежутка, непостоянство времени горения дуги, ошибки визуального фотометрирования.

В заключение проводится предварительная обработка статистических данных наблюдений. Вычисляются основные характеристики — математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение мат. ожидания по известным выражениям:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n}, \quad \sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N - N_i)^2}{n(n-1)}}$$

где  $N_i$  — результат единичного замера;  $n$  — число наблюдений.

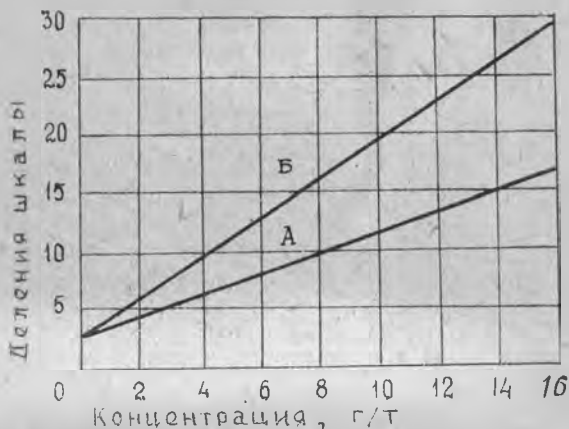


Рис. 10. Градуировочные графики для определения концентрации железа (А) и магния (Б) стилоском СЛ-11

Точность выполненных наблюдений оценивается величиной систематических ошибок, источниками которых являются: ошибки в построении градуировочных графиков (рис. 10); ошибки в методике выполнения анализов и др.

По вычисленным математическим ожиданиям из графиков, приведенных на рис. 10, определяется концентрация искомых элементов в моторном масле.

*Технический диагноз* о работоспособности изделия формулируется на основе изучения данных, полученных в ходе эксплуатации и испытаний. Основное диагностическое значение имеет не общее содержание продуктов износа, зависящее от наработки масла, периодичности его замены и дозаправки, а дисперсность частиц и скорость накопления примесей, т. е. выполненный спектрометрический анализ моторного масла в данной работе является частью диагностического исследования. Численные значения указанных показателей зависят от специфических условий работы узлов, емкости масляной системы, вязкости исследуемых масел и др.

В случаях обнаружения значительных изменений указанных показателей производятся повторные определения с более тщательным выполнением всех операций, и при подтверждении результатов принимается решение о досрочном снятии изделия или введении режима повышенного контроля.

## **5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Источники света для спектрального анализа (дуга, искра) представляют определенную угрозу здоровью, поскольку являются электрическими устройствами, работающими при повышенных напряжениях (до 10 кВ), мощными излучателями ультрафиолетовых потоков, источниками паров металлов. В силу этого в процессе работы должны приниматься меры защиты: надежное заземление прибора, применение защитных очков, вентиляция помещения и т. п. Кроме того вещества, используемые при исследовании (керосин, синтетические и минеральные масла), могут явиться источниками пожара и отравлений.

## **6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Описать изменения основных свойств масел, вызывающие их причины и влияние этих изменений на работу двигателя.
2. Описать физическую сущность ВЭС-метода и методики повышения его чувствительности.
3. Записать в журнал результаты наблюдений и провести статистическую обработку.
4. Заключение по результатам проведенного исследования.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Изменение свойств масел в процессе эксплуатации.
2. Факторы, обуславливающие изменение свойств масел.
3. Отрицательные последствия изменений свойств масел, проявляющиеся в работе двигателей.

4. Методы диагностирования технического состояния двигателя по анализу масла.
5. Методы оценки чистоты рабочих жидкостей.
6. Физическая сущность, преимущества и недостатки ВЭС-метода.
7. Сущность полуколичественного анализа.
8. Сущность методики повышения чувствительности ВЭС-метода.
9. Основные диагностические показатели состояния двигателя, которые необходимо выявить при исследовании моторных масел.

## Лабораторная работа 2

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА В СМАЗОЧНЫХ МАСЛАХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОГО БЕЗДИФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗАТОРА БАРС-3

## 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АНАЛИЗАТОРА БАРС-3

Анализатор позволяет определить концентрацию более десяти химических элементов, содержащихся в моторных, гидравлических маслах и топливе в лабораторных условиях и на ЛА.

Принцип действия прибора основан на возбуждении и регистрации характеристического рентгеновского излучения химических элементов, входящих в состав анализируемого вещества.

Характеристический линейный спектр зависит от вещества мишени (продуктов износа в исследуемом масле). Электроны в атоме образуют вокруг ядра совокупность последовательных энергетических уровней (оболочек). Наиболее прочно связанные в атоме электроны расположены на ближайшем к ядру энергетическом уровне, получившем название *K*-оболочки. Следующая, менее связанная с ядром группа электронов, образует *L*-оболочку. Далее следуют *M*, *N*, *O*, *P*-оболочки и т. д.

При выбивании электрона из *K*-оболочки, например рентгеновским квантом, его место заполняется электроном из более удаленных от ядра энергетических уровней. При электронных переходах между *K* и *L* энергетическими уровнями испускается квант характеристического излучения  $h\nu = E_L - E_K$ , дающий в спектре  $K_\alpha$  линию, характерную для облучаемого рентгеновским (в основном тормозным) излучением химического элемента. Переход на *K*-оболочку электронов с уровней *M*, *N* и других дают в спектре линии  $K_\beta$ ,  $K_\gamma$  и другие. Все перечисленные линии спектра называются *K*-серией (рис. 11).

Если рентгеновские кванты выбивают электроны из  $L$ -оболочки, заполнение их мест электронами из  $M$ ,  $N$ ,  $O$  и других энергетических уровней сопровождается испусканием квантов характеристического излучения  $L$ -серии, причем каждый химический элемент характеризуется определенной энергией квантов  $K$ ,  $L$  и других серий.

В зависимости от исследуемого элемента энергия квантов рентгеновского излучения регулируется изменением ускоряющей термоэлектроны разности потенциалов в рентгеновской трубке. При этом получают на выходе из анода преимущественно рассеянное характеристическое излучение с энергией квантов, соответствующей энергии связи  $K$  или  $L$  электронов в атоме конкретного химического элемента. Т. е. критическая разность потенциалов на трубке  $eV_{кр} \geq E_K (E_L)$  определяется энергией квантов, необходимой для выбивания  $K$  или  $L$  электронов исследуемого химического элемента.

Дополнительные рентгеновские фильтры, выполненные из фольги разных металлов, сужают спектр рассеянного характеристического излучения, идущий на регистрацию, путем поглощения той его части, которая не является характерной для данного химического элемента.

Кванты рентгеновского характеристического излучения преобразуются пропорциональным счетчиком в импульсы напряжения. Усиленные и сформированные импульсы регистрируются счетчиком импульсов.

Пропорциональный счетчик представляет собой двухэлектродную камеру, заполненную инертным газом (рис. 12...13). Попадающие в нее регистрируемые кванты вызывают ионизацию молекул газа-наполнителя. Образующиеся ионы ускоряются электрическим полем (к электродам счетчика прикладывается напряжение 250...800 В) до энергий, достаточных для вторичной ионизации молекул газа-наполнителя. В результате каждая пара первичных ионов

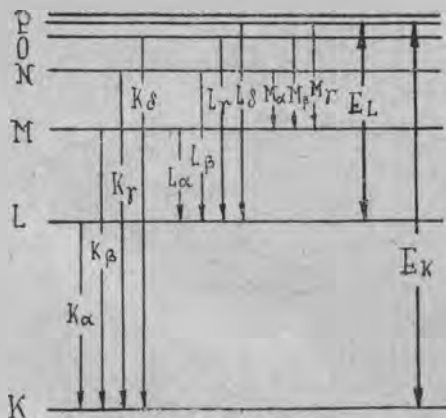


Рис. 11. Схема электронных переходов по энергетическим уровням

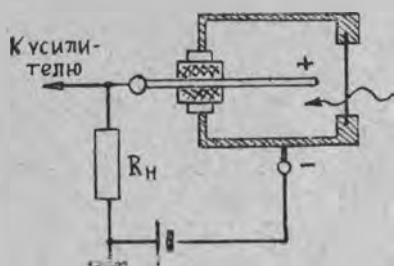


Рис. 12. Принципиальная схема пропорционального счетчика

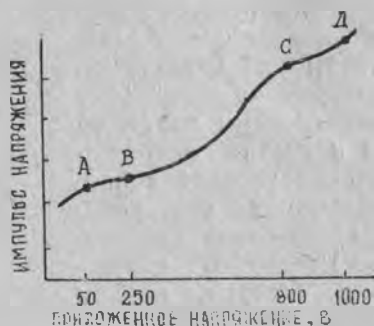


Рис. 13. Зависимость импульса напряжения от приложенного постоянного напряжения между электродами газоразрядного счетчика: *A—B* — ионизационная камера; *B—C* — пропорциональный счетчик; *C—D* — счетчик Гейгера-Мюллера

превращается в лавину вторичных, третичных и т. д. ионов. При этом резко возрастает чувствительность счетчика к регистрируемому излучению. Полный электрический заряд, собираемый на электродах, пропорционален энергии регистрируемой частицы.

Изменяя режим работы пропорционального счетчика (область *B—C* на рис. 13), можно настроить его на регистрацию частиц определенного характера и заданных энергий с минимальной чувствительностью к другим частицам или энергиям. Пропорциональный счетчик не только считает попадающие в него частицы, но и измеряет их энергию.

Измеряя скорость счета импульсов (количество импульсов за определенный временной интервал) по отдельным каналам и используя тарировочные зависимости, можно определить концентрацию соответствующего химического элемента в анализируемом масле.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе используется серийный рентгеновский бездифракционный анализатор БАРС-3, предназначенный для экспрессивного анализа материалов.

Анализатор имеет три сменные спектрометрические головки для анализа следующих элементов (по четырем каналам каждой головки соответственно): 1-я головка — железо (порядковое число в периодической системе  $Z = 26$ ), медь (29), цинк (30), свинец (82); 2-я головка — титан (22), хром (24), никель (28), мо-

либден (42); 3-я головка — кальций (20), марганец (25), кобальт (27), уран (92).

Первая и вторая головки регистрируют характеристическое рентгеновское излучение перечисленных элементов *K*-серии, третья головка регистрирует кванты *L*-серии.

Каждому спектрометрическому каналу (1...4) соответствует определенное значение высокого напряжения и тока рентгеновской трубки. В результате достигается оптимальное возбуждение рентгеновским излучением искомым элементов в исследуемом масле.

Питание анализатора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 или 60 Гц с допустимым отклонением  $\pm 10\%$  от номинального значения или от источника постоянного тока напряжением от 16 до 20 В.

Конструктивно анализатор состоит из двух блоков: датчика 1 и пульта управления 2 (рис. 14).

В блоке датчика размещены: рентгеновская трубка 4 типа БХ-3, высоковольтный преобразователь питания 3 рентгеновской трубки и пропорциональных счетчиков, пропорциональные счетчики 8 и сменная спектрометрическая головка 15.

Высоковольтный преобразователь 3 (состоящий из двух блоков) преобразует постоянное напряжение источника питания в импульсное напряжение питания с частотой 15...20 кГц и амплитудой до 10 В высоковольтного блока рентгеновской трубки 4 для получения высокого напряжения питания детекторов соответствующих каналов (соответственно блоки БВ-25 кВ и БВ-2 кВ).

Сменная спектрометрическая головка 15 предназначена для непосредственного преобразования квантов рентгеновского излучения в электрические импульсы и их усиления. Головка содержит четыре спектрометрических канала, состоящих из четырех рентгеновских излучателей 7, фильтров 6, пропорциональных счетчиков 8, двух согласующих и одного основного предусилителей импульсов 9.

Спектрометрические каналы сменной головки объединены в дифференциальный детектор, с большой эффективностью регистрирующий излучение, энергия которого лежит в узком диапазоне между значениями энергий краев поглощения фильтра 6 и излучателя 7 (рис. 14), т. е.  $E_1 < E_i < E_2$ .

Рентгеновские фильтры и излучатели выполнены из фольги специально подобранных металлов для каждого спектрометрического канала.

В корпусе пульта управления 2 размещены: блок формирования и усиления сигнала 10, пересчетное устройство 11, индикатор 12, блоки преобразования и стабилизации напряжения 14 и сетевой источник питания 13 с выходным транзистором импульсного стабилизатора + 12 В. На боковой панели пульта управления распо-

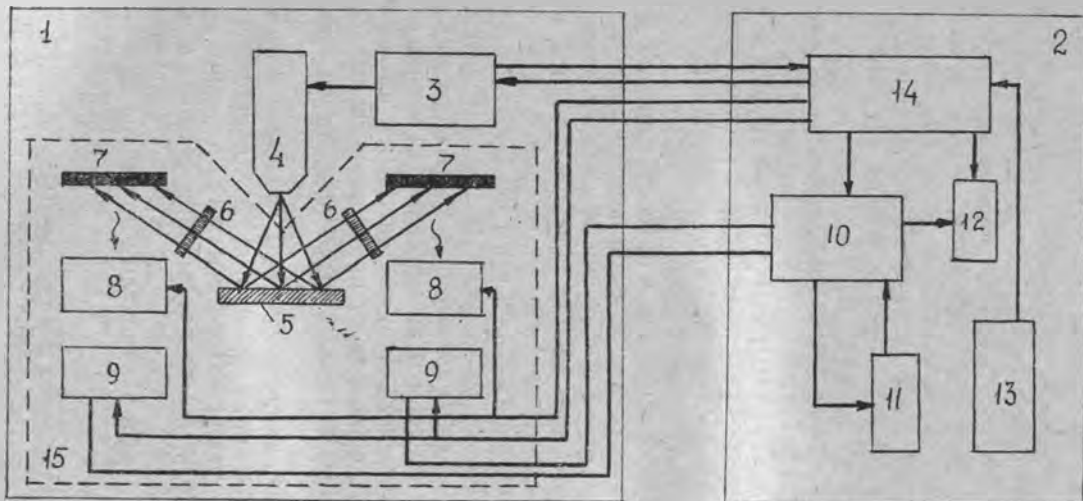


Рис. 14 Структурная схема анализатора рентгенового бездифракционного анализатора БАРС-3: 1 — датчик; 2 — пульт управления; 3 — высоковольтный преобразователь; 4 — рентгеновская трубка; 5 — исследуемый материал; 6 — фильтры; 7 — излучатели; 8 — пропорциональные счетчики; 9 — предусилители; 10 — блок формирования и усиления сигнала; 11 — пересчетное устройство; 12 — индикатор; 13 — сетевой источник питания; 14 — блоки преобразования и стабилизации напряжения; 15 — сменная спектрометрическая головка



ложен тумблер СЕТЬ-АККУМ, подключающий питание к прибору соответственно от сети или аккумулятора, гнезда для подключения аккумулятора, сетевые предохранители, гнездо СИГНАЛ для контроля сигналов, поступающих из спектрометрической головки.

На лицевой панели пульта управления расположены: цифровое табло индикатора 12, переключатель каналов КАНАЛЫ, кнопки ПУСК, СБРОС, ИНД, ЭКСП, светодиоды индикации наличия напряжения питания (ВЫСОКОЕ вкл., ПИТАНИЕ вкл.—БЛОКИРОВАНО).

Кнопка ПУСК включает высоковольтный преобразователь и соответствующий светодиод индикации. Через четыре секунды импульсы начинают подаваться на пересчетное устройство.

Время экспозиции (время подсчета количества импульсов) задается одной из кнопок экспозиции ЭКСП автоматически с помощью таймерного устройства с кварцевым генератором (8 кГц). Пересчетное устройство суммирует импульсы за 16 или 64 секунды. Одновременно с прекращением счета выключается высоковольтный преобразователь и гаснет светодиод ВЫСОКОЕ вкл. Результат высвечивается на семисегментном знаковом индикаторе. В любой момент времени оператор может включить индикатор, нажав кнопку ИНД.

Кнопка СБРОС служит для выключения высокого напряжения, остановки счета импульсов в пересчетном устройстве до окончания времени экспозиции и одновременного сброса записанной на индикаторе информации.

Свечение светодиода блокировки сигнализирует о наличии короткого замыкания на выходе, о неисправностях регулирующих цепей источников питания датчика и о несоответствии параметров источника питания.

Исследуемый материал размещается на столике установки в специальном держателе, выполненном из кадмия, дающего минимальный дополнительный фон.

### 3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работу необходимо выполнять в следующей последовательности.

1. Подготовить прибор к работе:  
включить анализатор в сеть. Тумблер СЕТЬ-АККУМ, установить в положение СЕТЬ;  
с помощью переключателя КАНАЛЫ выбрать нужный канал.
2. Используя эталоны с навесками Cu или Fe, на соответствующем канале с экспозицией 16 или 64 выполнить по 3...5 замеров с последующим вычислением мат. ожидания ( $\bar{X}$ ) и среднеквадра-

тичного отклонения мат. ожидания ( $\sigma$ ). Построить тарировочные зависимости веса  $G$  металла от скорости счета  $N$ :

$$\begin{aligned} & G_{\text{Fe}} = f(N_{\text{Fe}}) \\ \text{или} & G_{\text{Cu}} = f(N_{\text{Cu}}). \end{aligned}$$

Аналогично измерить фон и зафиксировать его на соответствующих графических зависимостях.

3. Приготовить фильтр и взвесить его на аналитических весах с точностью до 0,1 мг.

4. Приготовить 100 см<sup>3</sup> смеси исследуемого масла с керосином в соотношении 1 : 1.

5. Приготовить 100 см<sup>3</sup> смеси чистого масла с керосином в соотношении 1 : 1.

6. С помощью вакуумной установки с насосом Камовского профильтровать полученные смеси. Для максимального удаления масла, не трогая фильтр, на той же установке пролить 50 см<sup>3</sup> чистого керосина. Фильтр вынуть пинцетом и просушить.

Приготовленные фильтры взвесить на аналитических весах с точностью до 0,1 мг и поочередно уложить в кадмиевый держатель предметного столика анализатора.

8. Нажать кнопку канала, соответствующего регистрации железа или меди.

9. Нажать кнопку ПУСК. Зафиксировать результат счета на экспозиции 16 или 64 с. Через каждые 8...30 с после очередного замера повторить замер с фиксацией результата не менее трех раз;

10. Провести обработку статистических данных скорости отсчета — вычислить  $\bar{X}$  и  $\sigma$ .

11. Используя графические зависимости 1 или 2, определить весовое содержание железа и меди в масле в г/г.

12. Сравнить полученные данные с весовым методом.

13. Дать заключение по результатам исследования.

#### 4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С РЕНТГЕНОВСКИМ БЕЗДИФРАКЦИОННЫМ АНАЛИЗАТОРОМ БАРС-3

К источникам опасности в анализаторе относятся: рентгеновская трубка БХ-3, номинальный режим которой 24 кВ, 100 мкА; пропорциональные счетчики с напряжением питания до 800 В.

Конструкция анализатора обеспечивает биологическую защиту в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.007.0—75, ГОСТ 12.2.018—76 и основных санитарных правил работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений.

В конструкции анализатора предусмотрены блокировки, отключающие высокое напряжение при подъеме датчика.

Категорически запрещается для включения высокого напряжения на рентгеновской трубке искусственно замыкать контакты блокировки.

Корпус анализатора должен быть заземлен.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Описать принцип действия анализатора.
2. Занести в таблицу результаты измерений и выполнить их статистическую обработку.
3. Вычертить тарифовочный график.
4. Вычислить концентрацию железа или меди в исследуемом масле.
5. Сделать заключение по выполненной работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Причины загрязнения масел механическими примесями.
2. Изменение свойств масел в процессе эксплуатации.
3. Отрицательные последствия изменений свойств масел, проявляющиеся в работе двигателей.
4. Методы диагностирования технического состояния двигателя по анализу масла.
5. Методы оценки чистоты рабочих жидкостей.
6. Принцип работы анализатора.
7. Физическая сущность характеристического рентгеновского излучения.
8. Работа пропорционального газоразрядного счетчика.
9. Основные диагностические показатели состояния двигателя, которые необходимо выявить при исследовании моторных масел.

## Лабораторная работа 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В МОТОРНОМ МАСЛЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-МАГНИТНЫМ СПОСОБОМ (С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА ПОЖ-М)

#### 1. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ДМ-МЕТОДА

Метод позволяет получить информацию о содержании железа в моторном масле непосредственно на стоянке самолета, что способствует расширению сферы его применения. Возможность оценки дисперсности размеров частиц железа при использовании много-

слоиных фильтров позволяет повысить достоверность результатов определения технического состояния узлов трения, поскольку эта характеристика практически не зависит от сроков использования (паралотки) смазочных масел.

В основу ДМ-метода положена зависимость дисперсности и концентрации частиц железа в моторном масле от характера и стадии изнашивания трущихся поверхностей деталей. Для выделения частиц железа производится фильтрация проб масла через специальный многослойный фильтр. Величина ячеек фильтра выбирается соизмеримой с размерами частиц (1...15 мкм). После фильтрации производится измерение количества железа, осевшего на отдельных слоях фильтра. По количеству осевшего на фильтре железа можно оценить концентрацию железа в масляной системе двигателя, а по соотношению количества железа, осевшего на первом фильтре, к количеству железа на последнем фильтре — дисперсность частиц.

Содержание железа на фильтре определяется путем измерения магнитной восприимчивости материала, осевшего на фильтре, в магнитном поле постоянного магнита. Магнитная восприимчивость вещества  $K_m$  характеризуется изменением его намагниченности  $I$  под воздействием внешнего магнитного поля напряженностью  $H$ :

$$K_m = I/H.$$

Наиболее распространенным способом измерения магнитной восприимчивости веществ является способ измерения силы, с которой постоянный магнит притягивается к этому веществу.

Сила, с которой магнит взаимодействует с веществом, занимающим объем  $V$ , определяется из выражения

$$F = I \frac{dH}{dl} = K_m H V \frac{dH}{dl},$$

где  $dH/dl$  — характеристика неоднородности магнитного поля.

Переходя к удельной магнитной восприимчивости  $K_{уд}$ , имеем

$$F = K_{уд} \rho V H \frac{dH}{dl} = K_{уд} m H \frac{dH}{dl},$$

где  $K_{уд} = K_m/\rho$ ;  $m$ ,  $\rho$  — масса и плотность вещества.

Величина напряженности поля  $H$  и степень его неоднородности  $dH/dl$  зависят от характеристик постоянного магнита и расстояния от магнита до исследуемого вещества  $l$ . Принимая  $H$ ,  $dH/dl$  и  $K_{уд}$  постоянными при всех измерениях, величину силы притяжения магнита можно определить из выражения

$$F = k m,$$

где  $k$  — постоянная измерительного прибора.

Для измерения силы притяжения магнита к фильтру можно использовать рычажные или крутильные весы, которые по чувствительности близки друг к другу.

В приборе ПОЖ-М, получившем наибольшее распространение в ДМ-методе, используются малогабаритные крутильные весы с чувствительностью около 1 мг. Количество осевшего на фильтр железа определяется при этом по силе (моменту), которую необходимо приложить к коромыслу весов для отрыва от пробы исследуемого вещества эталонного постоянного магнита (рис. 15).

Исследуемый фильтр 1 помещается на предметном столике 2. Затем освобождается спиральная пружина 4, прижимающая укрепленный на конце коромысла весов 6 магнит 3 к пробе (к обратной стороне предметного столика 2). При закручивании спиральной пружины ручкой 7 создается момент, стремящийся оторвать магнит от предметного столика. По углу закручивания пружины, измеренному по шкале 5 в момент отрыва магнита, судят о магнитной восприимчивости пробы вещества на фильтре.

Для определения дисперсности частиц железа фильтрация масла производится через несколько слоев пористого материала (обычно 3...5). Так как изготовить фильтр с заданными размерами ячеек технически сложно, прибегают к упрощенной методике разделения частиц по размерам. Исследуемое масло пропускается через несколько слоев одинаковых фильтров, имеющих ячейки различных размеров (0,5...15 мкм). При этом на верхнем слое фильтра оседают преимущественно крупные частицы, на средних происходит дальнейшая дифференциация частиц по размерам, а на последнем слое оседают только самые мелкие. Наибольшей диагностической ценностью обладают верхний и нижний слой фильтра. Поэтому показатель дисперсности частиц  $n$  вычисляется как отноше-

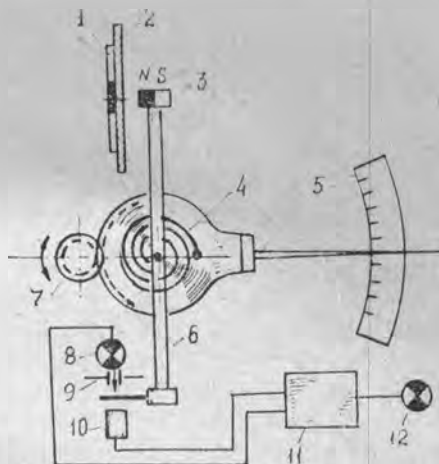


Рис. 15. Принципиальная схема прибора ПОЖ-М для измерения магнитной восприимчивости осадка на фильтре: 1 — исследуемый фильтр; 2 — предметный столик; 3 — постоянный магнит; 4 — спиральная пружина; 5 — шкала прибора; 6 — коромысло весов; 7 — ручка; 8 — лампа сигнального устройства; 9 — коллиматор; 10 — фотодиод; 11 — блок питания; 12 — сигнальная лампа

ние количества железа, осевшего на верхнем  $q_v$  и нижнем слоях  $q_n$  фильтра:

$$n = q_v/q_n.$$

Общее содержание железа в масле вычисляется как сумма измерений содержания железа на всех слоях фильтра:

$$q = \sum_{i=1}^n q_i.$$

Более информативным является показатель  $m$ , характеризующий скорость накопления железа в масле, который вычисляется из выражения

$$m = \frac{q_i - q_{i-1}}{t},$$

где  $q_i$  и  $q_{i-1}$  — общее содержание железа в масле при текущем и предыдущем измерениях, г/т;  $t$  — наработка масла между измерениями, ч.

Если между измерениями производилась замена или дозаправка масла, то показатели  $q$  и  $m$  определять нецелесообразно. В зависимости от значений показателей  $n$ ,  $m$ ,  $q$  могут быть приняты различные решения о дальнейшей эксплуатации двигателя: нормальная эксплуатация при частых проверках масла, при установленной периодичности проверок и прекращение эксплуатации двигателя для проведения капитального ремонта.

## 2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА ПОЖ-М

Работа прибора основана на измерении силы взаимодействия отфильтрованного железа (магнитного отпечатка) с полем постоянного магнита, укрепленного на коромысле крутильных весов. Чувствительная часть прибора заключена в пылевлагонепроницаемый корпус. Магнитный отпечаток помещается снаружи. Магнитная связь осуществляется через немагнитную (бронзовую) стенку прибора, выполненную в виде предметного столика с пружинным замком. Такая конструкция защищает механизм прибора от загрязнений и повреждений в процессе эксплуатации и обеспечивает стабильность установки фильтров относительно полюса магнита.

На верхней панели прибора (рис. 16) размещаются: уровень 3, индикатор напряжения питания 1, измерительная шкала 2, рычаг включения питания и сброса стрелки 5, ручка закрутки пружины и перемещения стрелки 6, сигнальная лампа момента отрыва магнита 4 и предметный столик 8. На нижней панели находятся винты 7 регулировки горизонтального положения прибора и крыш-

ка, под которой размещены элементы питания (шесть элементов типа 316).

Количество железа, содержащегося в магнитном отпечатке, определяется по углу закрутки пружины крутильных весов в момент отрыва магнита. С пружиной связана стрелка для отсчета показаний. Шкала прибора градуируется в граммах железа на тонну масла (г/т).

Прибор снабжен системой оптической сигнализации момента отрыва магнита от отпечатка. В момент отрыва магнита перекрывается световой поток, идущий от лампочки 8 на рис. 15 к фотодиоду 10, что приводит к загоранию сигнальной лампы 12 (или 4 на рис. 16).

Прибор позволяет определить содержание железа в масле, начиная с концентрации 0,1 г/т.

### 3. ПОДГОТОВКА ПРИБОРА К РАБОТЕ

Прибор приводится в горизонтальное положение при помощи винтов 7. Горизонтальному положению прибора соответствует центральное положение пузырька воздуха в уровне 3.

**ВНИМАНИЕ!** Перед установкой прибора необходимо убедиться в том, что рядом не находятся железные предметы, искажающие результаты измерений.

Проверка работоспособности прибора производится в следующей последовательности:

включить прибор ручкой 5 (рис. 16);

ручкой 6 установить стрелку прибора на нулевое деление шкалы (при совпадении стрелки с нулевым делением шкалы должна загореться сигнальная лампа 4);

переместить стрелку по часовой стрелке — при этом сигнальная лампа должна погаснуть;

поместить эталонный магнитный отпечаток на предметный столик 8 и зафиксировать его положение прижимной планкой (границы отпечатка необходимо совместить с окружностью, нанесенной на прижимной планке);

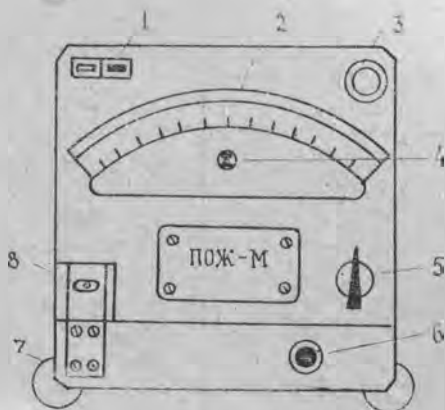


Рис. 16. Лицевая панель прибора ПОЖ-М: 1 — индикатор напряжения; 2 — шкала прибора; 3 — уровень; 4 — сигнальная лампа отрыва магнита; 5 — ручка включения питания и сброса стрелки; 6 — ручка закрутки пружины; 7 — винты установки прибора

плавно вращая ручку *б*, оторвать магнит от отпечатка (момент отрыва сигнализируется сигнальной лампой *4*);  
отметить положение стрелки в момент отрыва и повторить измерения 3...4 раза;

определить среднее значение показаний прибора и сравнить с данными, нанесенными на эталоне.

Прибор считается пригодным к работе, если напряжение питания соответствует норме (стрелка индикатора находится в красном секторе); сигнальная лампа горит при нулевом положении стрелки и гаснет при отводе стрелки за нулевое деление; содержание железа, указанное на эталоне, отличается от показаний прибора не более чем на 10%.

Измерение содержания железа в дальнейшей работе производится в последовательности, аналогичной проверке прибора по эталонному отпечатку.

#### 4. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ ОТПЕЧАТКОВ (ПОЗ-Т)

Прибор предназначен для перенесения информации о содержании железа в масле на фильтрующий элемент. Он представляет собой поршневой насос (шприц), позволяющий засасывать около 50 см<sup>3</sup> масла через систему фильтров.

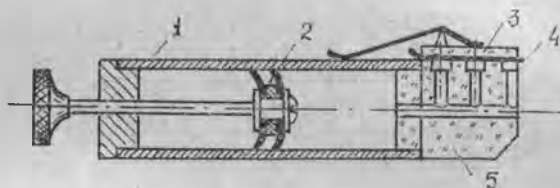


Рис. 17. Конструкция прибора ПОЗ-Т: 1 — корпус; 2 — поршень; 3 — замок; 4 — фильтрующий элемент; 5 — датчик

В конструкцию прибора (рис. 17) входят: дозатор (шприц), датчик и замок.

Дозатор состоит из цилиндрического корпуса *1*, изготовленного из нержавеющей стали, и штока с поршнем *2*.

Датчик *5* изготовлен из органического стекла, в котором выполнена система каналов с калиброванными отверстиями. Соотношение площадей каналов 1 : 2 : 4 позволяет получать отпечатки с различным объемом прошедшей через них жидкости.

Замок *3* состоит из рычага и крышки. Он позволяет зажимать фильтрующий элемент *4*, обеспечивая необходимую герметичность. При подъеме хвостовика замка крышка датчика открывается,



обеспечивая возможность перемещения фильтрующего элемента. При опускании хвостовика крышка прижимается к основанию датчика и фиксируется пружиной в закрытом положении.

## 5. ПОДГОТОВКА ПРИБОРА К РАБОТЕ

В эту операцию входят промывка прибора и проверка его работоспособности.

Промывка производится перед началом работы с очередной пробой масла, что исключает перенос продуктов износа и засорение проб масла. При промывке датчик прибора опускается в сосуд с чистым бензином Б-70 или керосином и производится несколько засасываний с выбросом жидкости в другую емкость.

Проверка работоспособности заключается в проверке герметичности поршневой группы, для чего:

- открыть крышку датчика, подняв хвостовик замка вверх;
- вставить в разъем датчика фильтрующий элемент;
- закрыть датчик, опустив хвостовик замка вниз;
- погрузить датчик и часть шприца в смесь бензина с маслом и, плавно вытягивая шток насоса, набрать смесь в дозатор;
- после полного вытягивания штока сделать выдержку 15...20 с, не вынимая датчик из жидкости;
- вынуть датчик из жидкости, извлечь фильтрующий элемент и выпустить из дозатора жидкость в мерный цилиндр.

Прибор считается пригодным к работе, если через фильтр засасывается не менее 40 см<sup>3</sup> смеси.

## 6. РАБОЧАЯ МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДМ-МЕТОДА В УСЛОВИЯХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Диагностирование авиационных двигателей с помощью ДМ-метода в аэродромных условиях производится в следующей последовательности:

- отбор проб масла из масляной системы двигателя;
- перенесение информации о содержании железа в масле на фильтрующий элемент;
- определение количества железа и расчет показателей  $n$ ,  $m$ ,  $q$ ;
- постановка технического диагноза состояния двигателя.

*Отбор проб масла* производится из масляной системы прогретого двигателя в течение первых 30 минут после его останова. Масло отбирается из сливных магистралей в объеме 150...200 см<sup>3</sup>. Перед отбором пробы необходимо слить 100...150 см<sup>3</sup> отстоя масла для исключения попадания в пробу железа, осевшего в процессах предварительных остановов двигателя.

*Перенесение информации о содержании железа в масле на*

фильтрующий элемент осуществляется с помощью прибора ПОЗ-Т. Пробы масла анализируются в первые два часа после отбора во избежание осаждения железа на стенки сосуда. Перед засасыванием проба разбавляется чистым бензином (керосином), проверенным на отсутствие железа, в соотношении 1:1. Смесь тщательно перемешивается и немедленно засасывается через три слоя аналитической ленты НЭЛ-4. Фильтрующий элемент извлекается из прибора и осушается помещением его на фильтрованную бумагу магнитным отпечатком наружу.

Высушенный отпечаток обрезается так, чтобы расстояние от магнитного отпечатка до линии обреза не превышало 3...5 мм. После этого фильтрующий элемент разделяется на три слоя с нанесением мягким карандашом порядкового номера и номера двигателя. Отпечатки заклеиваются липкой лентой КЛТ или помещаются в целлофановые пакеты для предотвращения потерь железа.

*Определение количества железа* производится прибором ПОЖ-М, предварительно подготовленным к работе и проверенным по специальным эталонам. Измерения производятся по магнитному отпечатку большого диаметра. Полученный результат измерений умножается на два, поскольку масло было разбавлено в соотношении 1:1.

Если через фильтрующий элемент при засасывании прошло менее 50 см<sup>3</sup> смеси, результат измерений  $q_{изм}$  необходимо привести к заданному объему  $q = q_{изм} 50/V$ , г/т,  $V$  — объем смеси, прошедшей через фильтр.

Если содержание железа в масле велико (более 14 г/т) и шкалы прибора не хватает, при измерении переходят на отпечаток меньшего диаметра. При этом полученный результат умножается соответственно на два или четыре.

В тех случаях, когда общее содержание железа в масле менее 0,8 г/т, показатели  $m$  и  $n$  не определяются.

*Постановка технического диагноза* включает анализ полученных данных и составление заключения о техническом состоянии двигателя. Как правило, для большинства типов ГТД значения показателей  $n < 5$ ,  $m < 14$  и  $q < 1$  г/т соответствуют нормальному процессу износа узлов трения. Двигатель при этом признается работоспособным до очередной проверки (50 ч). Значения  $n \geq 5$ ,  $m \geq 14$  и  $q \geq 1$  г/т указывают на наличие повышенного износа сопряженных пар. Двигатель при этом признается работоспособным, но переводится на режим усиленного контроля. Периодичность проверок масла при этом сокращается до 10...12 ч. Значения  $m \geq 15$ ,  $n \geq 5$  и  $q \geq 5$  г/т указывают на наличие недопустимого по интенсивности износа деталей. В этом случае принимается решение о досрочной съемке двигателя с эксплуатации и направлении его в капитальный ремонт. В заключении (техническом диагнозе),

помимо результатов проверки, приводятся формулярные данные двигателя (заводской номер, наработка с момента изготовления, наработка после последнего капитального ремонта и после очередной проверки).

## 7. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В лаборатории ГСМ работу необходимо выполнять в следующей последовательности:

приготовить три фильтра и взвесить каждый на аналитических весах с точностью до 0,1 мг. Фильтры пронумеровать;

приготовить 100 см<sup>3</sup> исследуемого масла, разбавленного чистым бензином или керосином в соотношении 1 : 1;

перенести информацию о содержании железа в масле на фильтрующий пакет с помощью прибора ПОЗ-Т;

просушить фильтры и взвесить каждый на аналитических весах с точностью до 0,1 мг (фильтры держать магнитным отпечатком вверх);

определить на приборе ПОЖ-М количество железа и сравнить с результатом взвешивания;

дать заключение по результатам исследования.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** все работы, связанные с замерами, выполнить не менее 3...5 раз и провести первичную статистическую обработку.

## 8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Физическая сущность ДМ-метода.
2. Основные технические данные приборов ПОЖ-М и ПОЗ-Т.
3. Рабочая методика проведения технической диагностики с указанием последовательности и содержания отдельных операций.
4. Результаты выполненных измерений и расчетов.
5. Заключение о техническом состоянии двигателя.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Задачи, решаемые с использованием ДМ-метода.
2. Физическая сущность ДМ-метода.
3. Факторы, влияющие на точность измерений содержания железа в моторном масле.
4. Факторы, учитываемые при постановке технического диагноза о состоянии двигателя.

## СОДЕРЖАНИЕ

Цель и порядок выполнения работы . . . . .	1
Общие сведения . . . . .	1
1. Изменение свойств масел в процессе эксплуатации . . . . .	1
2. Оценка чистоты моторных масел . . . . .	4
Лабораторная работа 1. Определение содержания продуктов износа в моторных маслах двигателей с использованием визуального эмиссионно-спектрального (ВЭС) метода (на основе стилоскопа СЛ-11)	7
1. Физическая сущность ВЭС-метода . . . . .	7
2. Методика повышения чувствительности ВЭС-метода . . . . .	9
3. Описание установки . . . . .	10
4. Методика выполнения работы . . . . .	13
5. Техника безопасности при проведении спектральных исследований . . . . .	17
6. Содержание отчета . . . . .	17
Контрольные вопросы . . . . .	17
Лабораторная работа 2. Определение концентрации продуктов износа в смазочных маслах двигателей с использованием рентгеновского бездифракционного анализатора. БАРС-3 . . . . .	18
1. Принцип действия анализатора БАРС-3 . . . . .	18
2. Описание установки . . . . .	20
3. Методика выполнения работы . . . . .	23
4. Техника безопасности при работе с рентгеновским бездифракционным анализатором БАРС-3 . . . . .	24
5. Содержание отчета . . . . .	25
Контрольные вопросы . . . . .	25
Лабораторная работа 3. Определение содержания железа в моторном масле дифференциально-магнитным методом (с помощью прибора ПОЖ-М)	25
1. Физическая сущность ДМ-метода . . . . .	25
2. Описание прибора ПОЖ-М . . . . .	28
3. Подготовка прибора к работе . . . . .	29
4. Описание прибора для получения магнитных отпечатков (ПОЗ-Т) . . . . .	30
5. Подготовка прибора к работе . . . . .	31
6. Рабочая методика диагностирования авиационных двигателей с помощью ДМ-метода в условиях их эксплуатации . . . . .	31
7. Методика выполнения работы . . . . .	33
8. Содержание отчета . . . . .	33
Контрольные вопросы . . . . .	33

Углов Борис Алексеевич  
Макаровский Игорь Мстиславович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА  
В МОТОРНЫХ МАСЛАХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Редактор Т. К. Кретьнина  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 30.02.90 г. Подписано в печать 28.03.90 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.  
Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Усл.п.л. 2,09. Усл.кр.-отт. 2,1. Уч.-изд.л. 1,9.  
Т. 350 экз. Заказ 155. Бесплатно.  
Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева.  
443086. Куйбышев, ул. Московское шоссе, 34.

---

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института.  
443001, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.