

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»**

**О. В. ХОЛОДИЛОВ, С. В. КОРОТКЕВИЧ**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА**  
**ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**  
**(оптический, магнитный, электрический)**

**Лабораторный практикум**

**Гомель 2009**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»

О. В. ХОЛОДИЛОВ, С. В. КОРОТКЕВИЧ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ  
(оптический, магнитный, электрический)

Лабораторный практикум

*Одобрено методической комиссией механического факультета*

Гомель 2009

УДК 681.7.048 (075.8)  
ББК 35.514  
Х73

Рецензент – д-р техн. наук, профессор *В. Г. Пинчук*  
(УО «ГГУ им. Ф. Скорины»).

**Холодилов, О. В.**

Х73 Методы и средства технической диагностики (оптический, магнитный, электрический) : лабораторный практикум / О. В. Холодилов, С. В. Короткевич : М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 53 с.  
ISBN 978-985-468-499-4

Приведены основные сведения из теории, общие указания по проведению работ, вопросы для самоконтроля, основная и дополнительная литература, справочные таблицы. Лабораторный практикум соответствует программе дисциплин «Методы и средства технической диагностики». В настоящее издание включены лабораторные работы по оптическому, магнитному и электрическому методам диагностики.

Предназначено для методического обеспечения как аудиторной (под руководством преподавателя), так и внеаудиторной (самостоятельной) работы студентов инженерно-технических специальностей.

**УДК 681.7.048 (075.8)**  
**ББК 35.514**

**ISBN 978-985-468-499-4**

© Холодилов О. В., Короткевич С. В., 2009  
© Оформление. УО «БелГУТ», 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Общие указания по выполнению лабораторных работ .....   | 4  |
| <i>Лабораторная работа № 1</i> Контроль загрязненности моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем ..... | 6  |
| <i>Лабораторная работа № 2</i> Контроль загрязненности смазочных масел .....                                | 16 |
| <i>Лабораторная работа № 3</i> Диагностирование загрязненности смазочных масел .....                        | 24 |
| <i>Лабораторная работа № 4</i> Оценка прочностных свойств граничных смазочных слоёв .....                   | 34 |
| <i>Лабораторная работа № 5</i> Оценка противозадирных свойств смазочных материалов .....                    | 43 |

## **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, предварительно ознакомившиеся с ее основным содержанием и порядком проведения по данному практикуму; изучившие основной теоретический материал по рекомендуемой учебной, научной и технической литературе; успешно сдавшие предварительный зачет на допуск к работе (контрольный опрос преподавателем устно, с помощью тестов и т. п.).

Студент должен соблюдать меры общей, электрической и противопожарной безопасности, которые следует предварительно изучить (в часы самоподготовки перед первым лабораторным занятием) и записаться в журнале по технике безопасности.

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать следующие правила:

1) подключать приборы и аппаратуру к источникам питания и проводить опыты допускается только с разрешения преподавателя, заведующего лабораторией (лаборанта);

2) не касаться находящихся под напряжением оголенных проводников и контактов;

3) при сборе электрической цепи источник тока подсоединять в последнюю очередь и только при разомкнутом ключе;

4) перед включением установки в цепь делители напряжения (потенциометры) поставить на минимальное напряжение, а ограничители тока (реостаты) – на максимальное сопротивление;

5) все изменения в цепи и переключения приборов производить только при выключенном питании.

Чтобы устранить возможность искажения показаний приборов, не допускается произвольное хождение студентов по лаборатории, в ней должен соблюдаться порядок и поддерживаться тишина.

Все черновые записи, результаты измерений, а также предварительные вычисления необходимо вести в специальной тетради, которую после завершения работы в конце занятия предъявить преподавателю на подпись. Отчеты по выполненным работам нужно оформлять на бланках отчета по лабораторным работам чернилами четко, разборчиво, аккуратно.

Рисунки, схемы, графики (на миллиметровке) требуется выполнять с соблюдением всех правил технического черчения и государственных стандартов.

Оформленный и подписанный студентом отчет предъявляется преподавателю перед началом очередного занятия. Студенты, не представившие отчет, к выполнению очередной работы не допускаются.

Зачеты по выполненным работам принимаются согласно расписанию занятий. К зачету студент обязан повторить основные теоретические сведения в объеме данной работы (используя основную и дополнительную литературу), содержание и порядок ее выполнения, а также подготовить ответы на контрольные вопросы.

При выполнении лабораторных работ вся группа разбивается на бригады по два-три студента (согласно алфавитному списку), которые в течение всего семестра выполняют работы по специальному графику.

Перед началом занятий дежурный студент принимает аудиторию и оборудование от заведующего лабораторией (лаборанта), а после завершения работ – сдает ее.

Отработка пропущенных по уважительной причине лабораторных работ проводится во внеучебное время под контролем преподавателя, заведующего лабораторией (лаборанта) с обязательной записью в специальном журнале, который ведется в каждой аудитории.

Студент несет материальную ответственность за порчу лабораторного оборудования и приборов.

## КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ И РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ГИДРОСИСТЕМ

**Цель работы.** Изучить метод прямого фотометрирования с целью диагностирования загрязненности моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем с использованием «Анализатора масла АМ-2к».

### 1 Краткие сведения из теории

В процессе работы двигателей и гидросистем моторные масла и гидравлические жидкости подвергаются окислению и полимеризации под действием кислорода воздуха и температуры на поверхностях трения. Процесс окисления и полимеризации масел характеризуется накоплением примесей, состав, структура и свойства которых различны. Накапливаемые примеси оказывают влияние на механизм изнашивания, который характеризуется механическим (абразивное), молекулярно-механическим (заедание), коррозионно-механическим (оки-слительное) видами.

Своевременная замена масел и рабочих жидкостей увеличивает срок службы трущихся деталей двигателей и гидроаппаратуры.

Контроль загрязненности масел осуществляют периодически путем отбора проб из картера двигателя и гидросистемы, их фотометрирования и сравнения оптической плотности масла с браковочным показателем. При достижении оптической плотностью масла браковочного показателя необходимо произвести его замену (таблица 1).

Организация службы диагностики моторных масел и рабочих жидкостей предусматривает составление графика отбора проб из узлов всех машин. В графике отражаются результаты фотометрирования масел. По разнице между браковочным показателем и оптической плотностью испытуемого масла планируется очередное проведение контроля.

Все контролируемые машины и механизмы согласно результатам фотометрирования распределяются по определенным числам месяца. Задача службы диагностики заключается в проведении контроля масел в машинах и механизмах, в соответствии с графиком. Данная система контроля позволяет получить картину текущей загрязненности масел узлов всех машин, вести учет расхода масла для каждого узла,

что характеризует его техническое состояние, исключить слив доброкачественного масла.

Ежеквартально по результатам фотометрирования масла производится анализ и выявляются узлы с повышенным расходом масла и скоостью загрязнения, которые подвергаются проверке для выявления технических неисправностей.

*Таблица 1 – Рекомендуемые показатели смены масла для различных двигателей*

| Марка масла  | Тип двигателя                                       | Браковочный показатель по показанию прибора, мкА | Толщина фотометрируемого слоя масла, мм |
|--|---|--|---|
| Зимняя:<br>М-8В <sub>2</sub> , М-8Г <sub>2</sub>   | СМД-14, Д-108,<br>ЯМЗ-236, ЯМЗ-238,<br>А-01М, Д-65Н | 40   | 0,15                                    |
| Летняя:<br>М-10В <sub>2</sub> , М-10Г <sub>2</sub> | СМД-14, Д-108,<br>ЯМЗ-236, ЯМЗ-238,<br>А-01М, Д-65Н |  |   |
| М-8В   | ГАЗ-24, УАЗ-469,<br>ЗИЛ-130, ЗИЛ-133,<br>ЗИЛ-131    | 130  |   |
| М-10Г <sub>2</sub>                                 | КАМАЗ   | 10   | 4,0                                     |
| Летняя:<br>МГ-30 (И-30А)                           | ЭО-4221, ЭО-4321,<br>ЭО-3322, ЭО-4121               | 30   |   |
| Зимняя:<br>ВМГЗ (АУ)                               | ЭО-5122, К-606,<br>ЭО-5015                          |  |   |
| Летняя/зимняя                                      | ЭО-2621   |  |   |

Организация службы диагностики смазываемых систем предусматривает стационарный и мобильный варианты использования метода фотометрирования в зависимости от специализации и специфики работы техники. Отбор проб масел включается в регламентные работы по ежесменному обслуживанию машин.

Последовательность отбора проб масла заключается в следующем: первая проба – после замены масла при техническом обслуживании и работы двигателя с гидроприводом не менее 10–15 мин; последующие пробы отбираются через промежутки времени, определяемые результатом фотометрирования их на приборе.

Периодичность отбора проб устанавливается экспериментально и за период между техническими обслуживаниями машины не должна превышать 3–4. Работоспособность моторных масел и рабочих жидкостей не имеет четкой зависимости от времени наработки, т. к. опре-

деляется индивидуальными факторами, к которым относятся: условия и режимы работы узла; его техническое состояние и конструктивные особенности; производительность системы очистки; чистота и объем доливаемого масла, а также наличие воды в смазочном материале. Эти факторы оказывают существенное влияние на скорость загрязнения масел. Поэтому при одинаковом времени наработки количество примесей в масле будет различно.

Использование метода фотометрирования позволяет вести контроль за степенью загрязнения масла и по достижении браковочного показателя производить его замену. Учитывая индивидуальные особенности каждого двигателя и различия в режимах и условиях эксплуатации, достижение браковочного показателя происходит через различный промежуток времени. Поэтому применение этого метода позволяет корректировать сроки службы масел.

Основной задачей в эффективном применении метода фотометрирования является согласование сроков замены масел, определенных путем фотометрирования, с установленными нормативно-технической документацией. На практике встречается три случая, когда время замены, установленное путем фотометрирования меньше, равно или больше инструктивного срока. В том случае, когда время замены меньше или равно инструктивному, необходимо провести замену масла. В случае, когда инструктивный срок службы масла истек, а согласно измерениям масло пригодно к эксплуатации, что наблюдается в основном для изношенных двигателей, необходимо учитывать разность между браковочным показателем и результатом фотометрирования.

Если разность между браковочным показателем и результатами измерения составляет до 20–30 ед., то замену масла необходимо передвинуть до достижения браковочного показателя. При этом техническое обслуживание переносится и совмещается с заменой масла. Однако удлинение срока службы масел не должно превышать 10 ра-бочих дней. При разности между показателями более 30 ед. машина ставится на техническое обслуживание без замены масла, однако при этом производится замена фильтрующих элементов.

Предложенная система замены масла предполагает на графике отбора проб планировать дату инструктивной наработки часов, что облегчает принять правильное решение по замене масел. При постановке машины на техническое обслуживание к числу регламентных

работ относится замена масла в двигателе и гидросистеме. Замена рабочей жидкости производится значительно реже, чем моторных масел, что вызвано спецификой ее старения. Качество проведения технического обслуживания контролируется по результатам анализа двух проб масел. Первой – перед сливом масла из картера двигателя и гидросистемы и второй – после залива чистого масла. Пробы моторного масла отбирают из картера прогретого и работающего двигателя, а рабочих жидкостей – из гидробака. Пробы масла отбирают после хорошего перемешивания его в масляной системе. Допускается отбор проб после 10–15-минутной работы двигателя и гидронасоса.

Фотометрирование первой пробы характеризует степень загрязнения сливаемого масла, а второй пробы – качество проведения замены масла и степень загрязнения масляной системы двигателя и гидросистемы (картер, маслопроводящие каналы, фильтры и т. д.). Чем меньше оптическая плотность масла, тем качественней проведена замена масла и техническое состояние масляных систем удовлетворительное. Если при проведении замены масла установлена большая его оптическая плотность, то масляная система двигателя загрязнена. В этом случае необходимо провести промывку масляной системы, т. к. это ухудшает качество очистки и уменьшает срок службы масла, а в конечном счете и срок службы двигателя.

## 2 Оборудование и приборы

В работе используются прибор «Анализатор масла АМ-2к», пробы масел, взятые из работающих двигателей и гидравлических систем, бензин, ветошь, пипетка.

Прибор «Анализатор масла АМ-2к» предназначен для контроля моторных масел и гидравлических жидкостей и является важным элементом в службе диагностики при эксплуатации различного рода двигателей внутреннего сгорания и гидросистем.

В основу работы прибора положен метод оценки степени загрязненности масел и гидравлических жидкостей по их оптической плотности с использованием закона Бугера–Ламберта–Бера, который выражается зависимостью

$$D = \varepsilon_{\lambda} c l, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\lambda}$  – молярный коэффициент поглощения,  $\text{м}^{-1}$ ;  
 $c$  – концентрация примесей;

$l$  – толщина фотометрируемого слоя, м.

Величина оптической плотности  $D$  определяется из выражения

$$D = I_{\phi}/I_M, \quad (2)$$

где  $I_{\phi}$  – фототок, генерируемый световым потоком, прошедшим через оптический канал прибора при отсутствии масла;

$I_M$  – фототок, генерируемый световым потоком, прошедшим через прибор при наличии в нем слоя масла.

Для удобства пользования прибором величина  $I_{\phi}$  в формуле (1) при определении оптической плотности принята постоянной и задается электрической схемой. Применение стабилизатора напряжения для источника света обеспечивает получение стабилизированного светового потока, который генерирует в фотоприемнике фототок, усиливаемый дифференциальным усилителем и регистрируемый стрелочным индикатором. В зависимости от степени загрязнения масла на фотоприемник попадает различный световой поток, возбуждающий в нем соответствующий ток.

Принципиальная блок-схема анализатора приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Блок-схема прибора «Анализатор масла АМ-2к»

Конструктивно прибор состоит из измерительного 1 и механического 2 блоков (рисунок 2).

Механический блок (рисунок 3) состоит из полого корпуса 1, выполненного с двумя щелевыми отверстиями для установки фотометрических кассет 2.



Рисунок 2 – Общий вид прибора:

1 – измерительный блок; 2 – механический блок

Корпус 1 разделен перегородкой, выполненной с двумя взаимно перпендикулярными отверстиями. В боковом отверстии установлена втулка 3 с источником света 4. На торцах другого отверстия установлены светофильтры 5. На торцах корпуса 1 имеются крышки 6, каждая из которых выполнена с центральным отверстием, в которое вмонтировано стекло 7. На выступающей резьбовой части крышки установлен маховичок 8, осуществляющий фиксацию кассет 2.

В центральных отверстиях крышек 6 на одинаковом расстоянии от источника света 4 посредством втулок 9 размещены фотоприемники 10.

Фотометрическая кассета (рисунок 4) предназначена для создания фотометрируемого слоя при анализе масел. Она состоит из корпуса 1, крышки 2, резьбовой пробки 3 и стопорной шайбы 4. В корпусе 1 выполнено боковое отверстие 5 для слива избыточного масла при создании фотометри-

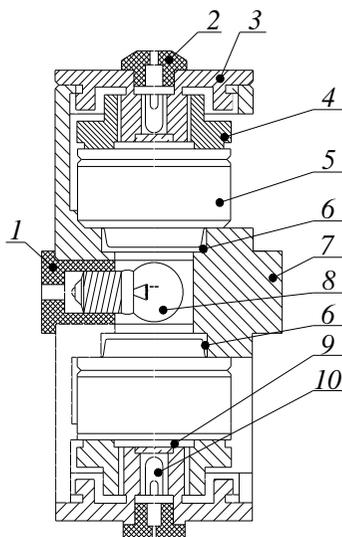


Рисунок 3 – Механический блок

руемого слоя. Резьбовая пробка 3 выполнена с конической торцевой частью и цилиндрической полостью 6, в нижнем торце которой установлено подвижное окно 7.

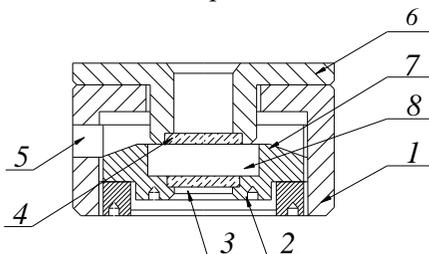


Рисунок 4 – Фотометрическая кассета

Крышка 2 с отверстием и выступающей цилиндрической частью, на торце которой имеется неподвижное окно 8, установлена на торце корпуса 1 и выполнена съемной. Одна из кассет настроена на толщину фотометрируемого слоя 0,15, а другая – на 4,0 мм для анализа

соответственно моторных масел и рабочих жидкостей.

Измерительный блок включает стабилизатор источника света, дифференциальный усилитель фототока, измерительный мост, блок питания, силовой трансформатор, стрелочный индикатор и органы управления.

### 3 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с устройством и принципом действия «Анализатора масла АМ-2к».

2 Отвинтить маховичок и вынуть две кассеты из механического блока. Снять две крышки кассет в соответствии с рисунком 5, а.

3 Протереть стекла кассет сначала смоченной бензином, а затем сухой ветошью, как показано на рисунке 5, б.

4 Закрыть крышки кассет, установить их в механический блок и зафиксировать маховичком.

5 Установить переключатель «Предел измерения» в положении «0–100».

6 Тумблер «Сеть» переключить в положение «Вкл». При этом должна загореться сигнальная лампочка.

7 Резистором «Уст. 0» установить стрелку индикатора на нуль.

8 Установить переключатель «Предел измерения» в положение «200–300».

9 Нажать кнопку «Измерение», при этом стрелка индикатора должна установиться на делении 100. При необходимости произвести поднастройку резистором «Уст. 300».

10 Отвинтить маховичок, вынуть кассету из верхней щели механического блока с толщиной фотометрируемого слоя 0,15 мм и снять крышку.

11 Набрать пипеткой тщательно перемешанную пробу анализируемого моторного масла и нанести на стекло кассеты 2–3 капли.

Установить крышку кассеты и проверить однородность масляного слоя между стеклами согласно рисунку 5, в. При наличии воздушных пузырей с помощью наклонного подъема и опускания крышки добиться их удаления. Если удаление пузырей не достигнуто, операции 2, 3, 11 повторить.

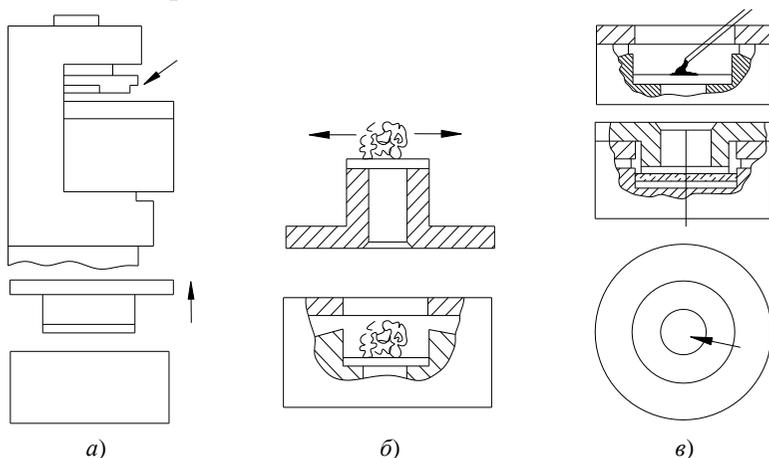


Рисунок 5 – Порядок демонтажа кассеты (а), схема очистки стекол кассеты (б) и введения пробы анализируемого масла (в)

12 Вставить кассету в механический блок и зафиксировать, завинчивая маховичок.

13 Нажать кнопку «Измерение» на 5–10 с и по стрелочному индикатору произвести отсчет показания, учитывая предел измерений. На пределе измерения «0–100» показания считываются с микроамперметра, а для пределов «100–200» и «200–300» к показаниям микроамперметра необходимо соответственно добавить значения 100 и 200.

*Например, стрелка микроамперметра установилась на делении 40, а переключатель «Предел измерения» установлен в положении «100–200», тогда общее показание прибора равно 140 мкА. Если переключатель установлен на пределе «200–300», то общее показание составляет 240 мкА.*

14 Повторить п. 13 не менее трех раз.

15 Определить оптическую плотность масла по формуле

$$D = \lg \frac{300}{\Pi_{и} + K}, \quad (3)$$

где  $\Pi_{и}$  – показания стрелки индикатора;

$K$  – предел измерений.

16 Найти среднее значение оптической плотности

$$\langle D \rangle = \left( \sum_{i=1}^n D_i \right) / n;$$

абсолютные погрешности  $\Delta D_i = |D_i - \langle D \rangle|$ ;

среднюю квадратичную погрешность  $\langle \sigma \rangle = \sqrt{\frac{\sum (\Delta D_i)^2}{[n(n-1)]}}$

и доверительный интервал  $\Delta = t \langle \sigma \rangle$  при  $P = 0,95$ .

Результат записать в следующей форме:

$$D = (\langle D \rangle \pm \Delta) \text{ при } P = 0,95.$$

Занести данные измерений и расчетов в протокол испытаний (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты измерений и расчетов

| Номер пробы | $K$ | $\Pi_{и}$ | $D_i$ | $\langle D \rangle$ | $\Delta D$ | $\langle \sigma \rangle$ |
|-------------|-----|-----------|-------|---------------------|------------|--------------------------|
| 1           |     |           |       |                     |            |                          |
| 2           |     |           |       |                     |            |                          |
| 3           |     |           |       |                     |            |                          |

17 Сравнить полученные измерения с допустимыми величинами оптической плотности (см. таблицу 1) и сделать заключение о пригодности масла к дальнейшей эксплуатации в двигателе.

18 Промыть фотометрическую кассету с пробой моторного масла, для чего снять верхнюю крышку кассеты, вытереть масло со стекол кассеты ветошью, смоченной бензином, нанести 5–6 капель бензина на нижнее стекло, вытереть насухо оба стекла кассеты, собрать кассету и вставить в корпус механического блока.

19 Включить тумблер «Измерение» и проверить установку стрелки индикатора на деление 100, при этом переключатель «Предел измерений» должен быть установлен на пределе «200–300». Переключо-

чить «Предел измерений» в положение «0–100» и проверить установку стрелки на нуль.

20 Установить кассету для фотометрирования рабочих жидкостей с толщиной слоя 4,0 мм в верхнюю щель, а кассету для фотометрирования моторных масел с толщиной слоя 0,15 мм – в нижнюю.

21 Провести оценку качества рабочей жидкости гидросистемы в соответствие с пп. 5–18.

### **Содержание отчета**

Наименование и цель работы, объект исследования. Блок-схема и описание работы прибора «Анализатор масла АМ-2к». Результаты измерений и вычислений оптической плотности моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем. Выводы по лабораторной работе, ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1 Описать организацию службы диагностики моторных масел и рабочих жидкостей.

2 К какому типу диагностического оборудования относится «Анализатор масла АМ-2к»?

3 Принцип действия прибора «Анализатор масла АМ-2к».

4 Указать причины потери работоспособности масел и рабочих жидкостей гидросистем.

5 Как определяется качество моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем прибором типа «Анализатор масла АМ-2к»?

### **Список литературы**

1 **Справочник по триботехнике.** В 3 т. / под ред. М. Хебда и А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1992. – 730 с.

2 **Кирпиченко, Ю. Е.** Основы трибологии: Теория. Лабораторный практикум. Упражнения / Ю. Е. Кирпиченко, А. Ф. Трофименко. – Гомель : Инфотрибо, 1995. – 228 с.

3 **Богданович, П. Н.** Трение и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск : Выш. шк., 1999. – 374 с.

4 **Кламман, В. А.** Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение : междунар. стандарты / В. А. Кламанн. – М. : Химия, 1988. – 486 с.

5 **Топлива, смазочные материалы, технические жидкости.** Ассортимент и применение : справ. изд. / под ред. В. М. Школьников. – М. : Химия, 1989. – 432 с.

## КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

**Цель работы.** Изучить методику оперативной диагностики загрязненности масел с использованием термокапиллярного эффекта.

### 1 Краткие сведения из теории

Увеличение стоимости машин и их технического обслуживания, а также повышение требований к их надежности приводит к необходимости диагностирования состояния узлов трения, работающих в условиях смазывания.

Анализ эффективности использования смазочных материалов показывает, что отсутствие обоснованных предельных значений показателей состояния масла и сроков его замены приводит либо к не использованию потенциальных рабочих свойств масла, либо к использованию масла низкого качества. Все это снижает надежность и долговечность трибосопряжений.

Одним из основных факторов, учитываемых при проведении профилактических мероприятий по техническому обслуживанию механизмов, является загрязненность моторных и трансмиссионных масел, которая возникает вследствие следующих причин:

- результат неполного сгорания топлива, окисления масла (так называемые органические загрязнения);
- попадание в систему циркуляции масла частиц пыли, продуктов изнашивания деталей трибосопряжения (неорганические примеси) [1].

Превышение допустимых норм содержания органических и неорганических примесей в масле приводит к ускоренному выходу из строя механизма.

Наиболее широко распространены оптические средства оценки загрязненности масла [2–4], которые достаточно просты и относительно дешевы. Однако для известных оптических методов имеет место ряд недостатков, среди которых малая информативность, нелинейность корреляционной зависимости между загрязненностью масла и его оптическими характеристиками.

Известен способ определения загрязненности моторных масел, использующий закономерности взаимодействия теплового лучистого потока (ТЛП) с пробой исследуемого масла [4].

На основе экспериментальных исследований была разработана методика оценки работоспособности масел по их загрязненности [5], которая позволяет определять помимо общей загрязненности масла (растворимые и нерастворимые примеси), загрязненность только нерастворимыми примесями.

### 1.1 Теоретические основы методики

Локальное воздействие ТЛП на поверхность масла вызывает возникновение градиента поверхностного натяжения, связанного с градиентом температуры на границе освещенной зоны зависимостью:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (1)$$

Следствием этого является возникновение конвективного движения в поверхностном слое масла. Конвекция в значительной степени обусловлена термокапиллярными эффектами и усиливается термодиффузией. При некоторой разнице температур  $\Delta T$  в исходном состоянии поверхностного слоя масла и после локального нагрева в системе устанавливается термодинамическое равновесие. При увеличении температуры равновесие нарушается и межфазная граница раздела воздух – масло приобретет криволинейную форму (рисунок 1). При этом форма поверхности масла изменяется со временем по закону

$$z = h + \xi(x, t).$$

Уравнение равновесного состояния поверхности при данном градиенте температур можно представить в виде:

$$\rho_0 g \left[ \xi + (\alpha \Delta T - \beta \Delta c) \xi^2 / 2h \right] = k \left[ \sigma_0 - \xi \left( \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \left( \frac{\Delta T}{h} \right) - \xi \left( \frac{\partial \sigma}{\partial c} \right) \left( \frac{\Delta c}{h} \right) \right],$$

$$\Delta c = - \frac{D_t}{D} c_0 \Delta T, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – плотность масла;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\xi(x, t)$  – функция, описывающая изменение кривизны границы раздела;

$x$  – ось координат, направленная вдоль межфазной границы;

$t$  – время;

$\alpha, \beta$  – коэффициенты теплового и концентрационного объемного расширения;

$T$  – температура масла;

$c$  – концентрация дисперсных частиц, мас. %;

$h$  – толщина слоя масла;

$k$  – кривизна межфазной поверхности;

$\sigma$  – поверхностное натяжение;

$c_0$  – концентрация дисперсных частиц в контролируемом объеме;

$D, D_t$  – коэффициенты диффузии и термодиффузии.

Анализ этого уравнения показывает, что параметры искривленности межфазной поверхности  $k, \xi$  определяются величиной поверхностного натяжения  $\sigma_0$ , градиентами  $\frac{\partial \sigma}{\partial T}, \frac{\partial \sigma}{\partial c}$ , концентрацией

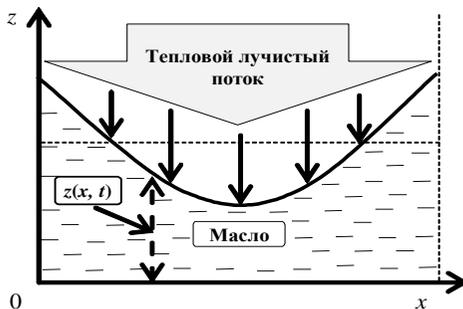


Рисунок 1 – Деформация межфазной поверхности при нарушении конвективной устойчивости

$c_0$  при постоянных значениях  $\Delta T, h, \rho_0, \alpha, \beta$ . С достаточной точностью можно считать, что  $\frac{\partial \sigma}{\partial T} = \text{const}$ , т. е. при одинаковых условиях параметры искривленности межфазной поверхности в равновесном состоянии определяются концентрацией содержащегося в ней вещества.

На рисунке 2 изображена блок-схема установки (на основе «Анализатора масла АМ-2к»), позволяющей осуществить проверку теоретических положений.

На свободную поверхность анализируемой пробы масла 5 воздействуют сфокусированным с помощью линзы 6 оптическим излучением лампы накаливания 7.

На выходе пробы оптическое излучение фокусируется с помощью линзы 4 на чувствительную площадку фотоприемника СФ2-1А 3.

Электрический сигнал на выходе фотоприемника усиливают 1 и регистрируют с помощью микроамперметра 2. Лампа накаливания, являясь источником светового потока, одновременно создает тепловой лучистый поток.

Рисунок 2 – Блок-схема установки для исследования взаимодействия лучистого

теплового потока с пробой масла:

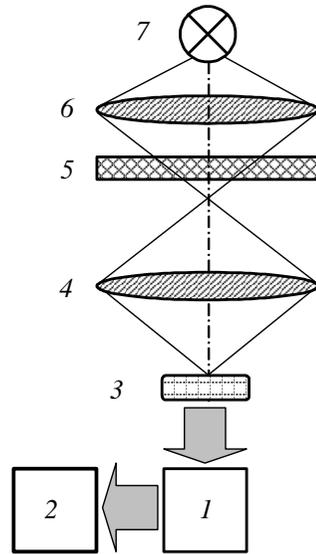
- 1 – предварительный усилитель; 2 – микроамперметр;  
3 – фотоприемник; 4, 6 – фокусирующие оптические  
элементы; 5 – кювета с пробой масла;  
7 – лампа накаливания

Величиной тока нити накаливания устанавливают такую величину интенсивности ТЛП, нижняя граница которой достаточна для создания необходимого градиента температур, вызывающего искривление межфазной поверхности, а верхняя граница определяется интенсивностью ТЛП, при которой происходит полное удаление слоя масла из зоны фотометрирования (просветление). При этом в плоскости размещения пробы масла создается освещенность  $10^3-10^6$  лк при токе нити накаливания 1,75 А. Толщина слоя масла в кювете составляет 1,0–3,0 мм и подбирается таким образом, чтобы при заданной интенсивности ТЛП межфазная поверхность искажалась, но полного «просветления», т. е. удаления масла из зоны фотометрирования, не происходило:  $\xi(x, t) \neq h$ .

Для установления корреляции между содержанием нерастворимых примесей и интенсивностью прошедшего излучения были исследованы пробы масла М-8Дм, содержащие нерастворимые примеси в виде частиц карбонильного железа дисперсностью 0,5–12 мкм с концентрациями 0,05; 0,10; 0,15; 0,18 мас. %. Для оценки характера временной зависимости интенсивности ТЛП показания микроамперметра снимались через каждые 20 с после включения источника света.

В области воздействия оптического излучения происходит искривление межфазной поверхности, обусловленное наличием температурного градиента на границе освещенной и неосвещенной области поверхности (см. рисунок 2), приводящее к уменьшению толщины слоя масла в зоне воздействия ТЛП и соответственно к увеличению интенсивности оптического излучения на выходе пробы масла.

Через некоторый промежуток времени толщина слоя масла стабилизируется, причем в этот момент интенсивность прошедшего оп-



тического излучения имеет максимальное значение, которое сохраняется определенное время, а затем начинает медленно релаксировать – имеет место некоторое уменьшение фототока (рисунок 3), связанное с уменьшением градиента температуры за счет теплопроводности и конвекции и связанным с этим уменьшением разности поверхностного натяжения в освещенной и неосвещенной зонах.

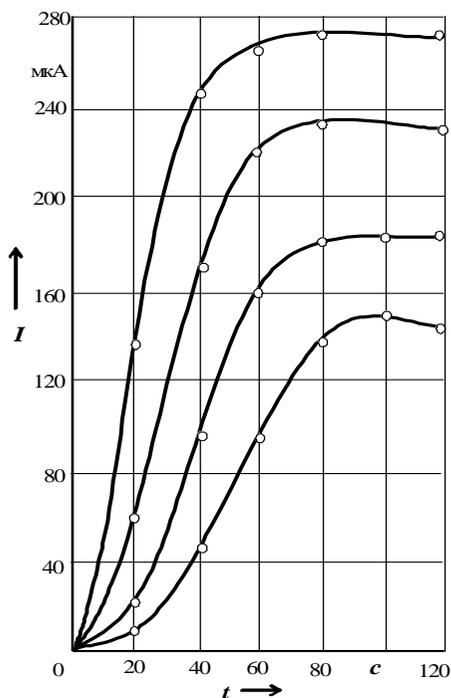


Рисунок 3 – Временная зависимость фототока от концентрации  $c$ , мас. %, нерастворимых примесей в масле: 1 – 0,05; 2 – 0,10; 3 – 0,15; 4 – 0,18

При этом степень деформации межфазной поверхности постепенно уменьшается, что сопровождается уменьшением величины оптического излучения, прошедшего через исследуемую пробу масла.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует, что при выбранных условиях эксперимента время достижения максимального значения фототока составляет  $\approx 100$  с. Причем это время зависит от вязкости масла.

Для промежутка времени, в течение которого сохраняется максимальное значение фототока, справедливо уравнение состояния (2).

Было установлено, что между максимальным значением фототока  $I_{\max}$  и содержанием механических примесей  $c_0$  в некотором диапазоне концен-

траций существует эмпирическая зависимость, аппроксимируемая линейной функцией (коэффициент корреляции  $r = 1,0$ ), не зависящей от вязкости масла (рисунок 4):

$$I_{\max} = 118 + 884c_0. \quad (3)$$

Для определения общей загрязненности масла находят отношение максимального значения фототока для проб чистого и грязного масел.

Нижняя граница интенсивности оптического излучения соответствует величине теплового потока, достаточного для создания необходимого градиента температур, вызывающего искривление межфазной поверхности.

Верхняя граница интенсивности, при выбранной толщине пробы, обеспечивает отсутствие полного просветления пробы масла, что является необходимым условием измерений.

Установлено, что при оптимальных значениях толщины слоя масла и интенсивности оптического излучения ошибка измерения концентрации ( $> 0,05$  мас. %) механических примесей не превышает  $\pm 5$ . Для получения такой точности необходимо обеспечить постоянство толщины слоя масла.

Линейная зависимость между максимальным значением фототока и концентрацией нерастворимых примесей сохраняется и при использовании в качестве добавок примесей, выделенных из масел М12Ву, М10Г<sub>2</sub>, М8Дм методом центрифугирования, работавших соответственно в двигателях ЗМЗ24-01, ЯМЗ-240Б, 8ДВТ-330. Полученные зависимости строятся один раз и в дальнейшем служат в качестве тарировочных.

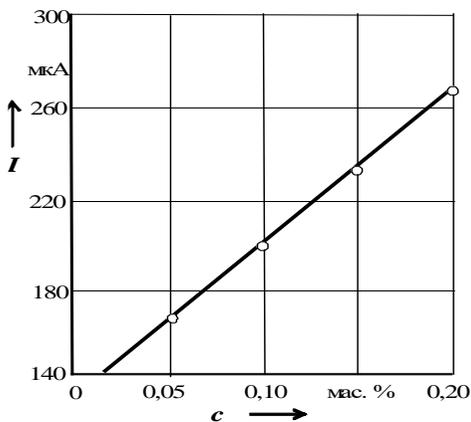


Рисунок 4 – Зависимость максимального значения фототока от концентрации нерастворимых примесей в масле

## 2 Оборудование и приборы

В работе используют прибор «Анализатор масла АМ-2к», пробы масел, взятые из работающих двигателей и гидравлических систем, бензин, ветошь, пипетка.

## 3 Порядок выполнения работы

- 1 Ознакомиться с устройством и принципом действия «Анализатора масла АМ-2к».
- 2 Установить путем изменения тока нити лампы накаливания (см.

рисунок 2) интенсивность излучения, создающую в плоскости размещения кюветы с пробой освещенность  $5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3$  лк (верхняя граница освещенности соответствует интенсивности теплового излучения лампы накаливания, при которой не происходит искривления межфазной поверхности, нижняя – интенсивности теплового излучения, достаточной для регистрации прошедшего потока фотоприемником).

3 Поместить в область фотометрирования пробу чистого масла толщиной 0,1–0,2 мм.

4 Замерить интенсивность прошедшего излучения путем регистрации тока фотоприемника  $I_1$ .

5 Поместить в область фотометрирования пробу работавшего масла толщиной 0,1–0,2 мм.

6 Замерить интенсивность прошедшего излучения путем регистрации тока фотоприемника  $I_2$ .

7 Определить общую загрязненность масла, для чего измерить его оптическую плотность  $D$ , определяемую по формуле

$$D = \lg(I_1/I_2),$$

где  $I_1, I_2$  – ток фотоприемника для проб чистого и работавшего масла соответственно.

8 Найти среднее значение оптической плотности

$$\langle D \rangle = \left( \sum_{i=1}^n D_i \right) / n;$$

абсолютные погрешности  $\Delta D_i = |D_i - \langle D \rangle|$ ;

среднюю квадратичную погрешность  $\langle \sigma \rangle = \sqrt{\frac{\sum (\Delta D_i)^2}{[n(n-1)]}}$

и доверительный интервал  $\Delta = t \langle \sigma \rangle$  при  $P = 0,95$ .

Результат записать в следующей форме:

$$D = (\langle D \rangle \pm \Delta) \text{ при } P = 0,95.$$

9 Занести данные измерений и расчетов в протокол испытаний (таблица 1).

10 Для определения концентрации нерастворимых примесей в область фотометрирования поместить пробу масла толщиной 1,5–2,5 мм.

11 Установить путем изменения тока нити лампы накаливания ин-

тенсивность изучения, создающую в плоскости размещения кюветы с пробой освещенность  $6 \cdot 10^3$ – $6 \cdot 10^5$  лк.

Таблица 1 – Результаты измерений и расчетов

| Номер пробы | $I_1$ | $I_2$ | $D_i$ | $\langle D \rangle$ | $\sigma$ | $\Delta D$ | $I_{2\max}$ |
|-------------|-------|-------|-------|---------------------|----------|------------|-------------|
| 1           |       |       |       |                     |          |            |             |
| 2           |       |       |       |                     |          |            |             |
| 3           |       |       |       |                     |          |            |             |

12 Определить величину максимальной интенсивности прошедшего излучения путем измерения тока фотоприемника  $I_{2\max}$ .

13 По величине тока  $I_{2\max}$  с использованием калибровочного графика по формуле (3) определить концентрацию механических примесей.

### Содержание отчета

Наименование и цель работы, объект исследования. Блок-схема и описание работы установки. Результаты измерений и вычислений оптической плотности смазочных масел. Выводы по лабораторной работе, ответы на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

- 1 Сущность физических процессов, лежащих в основе методики диагностирования загрязненности смазочных масел.
- 2 Принцип действия устройства для реализации метода.
- 3 Порядок проведения контроля.

### Список литературы

- 1 Григорьев, М. А. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания / М. А. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1983. – 214 с.
- 2 Сорокин, Г. М. Применение прямого фотометрирования для оценки работоспособности моторных масел / Г. М. Сорокин, Б. И. Ковальский // Трение и износ. – 1984. – Т. 5. – № 6. – С. 978–982.
- 3 ГОСТ 24943-81. Фотометрический метод оценки загрязненности моторных масел. – Введ. 1981-11-01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 4 с.
- 4 А. с. 1396012 СССР МКИ<sup>3</sup> G 01 N 21/59. Способ оценки загрязненности моторных масел механическими примесями / Л. В. Маркова, Н. К. Мышкин, О. В. Холодилов (СССР). – № 4126599; заявл. 09.07.86 ; опубл. 15.05.88, Бюл. № 18. – 4 с.
- 5 Маркова, Л. В. Экспресс-метод определения загрязненности моторных масел / Л. В. Маркова, О. В. Холодилов // Трение и износ. – 1988. – Т. 9. – № 1. – С. 155–158.

# ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

**Цель работы.** Изучить основные характеристики оптико-магнитного детектора (ОМД) и методику диагностирования загрязненности смазочных масел.

## 1 Краткие сведения из теории

Одним из важнейших показателей состояния машин и механизмов является величина их износа. Смазочное масло является неотъемлемым элементом конструкции трибосистемы. Уровень его деградации – важный показатель работоспособности и состояния системы. Диагностирование состояния машин и механизмов, работающих в условиях смазывания, может успешно осуществляться на основе анализа частиц износа и оценки свойств смазочной среды. Информацию об изнашивании механизма без его остановки и разборки можно получить по продуктам износа, содержащимся в смазочном масле [1].

Оптическая плотность масла и ее изменение в процессе эксплуатации характеризуют общую загрязненность масла. В данном случае под общей загрязненностью понимается изменение оптического про-пускания масла в результате окисления и старения, а также изменения содержания механических частиц в нем.

Поскольку загрязненность масел имеет различную природу, то естественным является стремление осуществить ее дифференцированную оценку. Существует большое количество методов, позволяющих это осуществить.

Так, с помощью *оптических методов* удается оценить общую загрязненность масла и концентрацию механических примесей. Однако при диагностике изнашивания смазанных узлов трения необходимо обеспечить возможность отделения металлических частиц износа от частиц другой природы (кремнезем, сажа и т. п.). Для этой цели используют *магнитные методы*, позволяющие выделить парамагнитные и ферромагнитные частицы.

Среди устройств, реализующих эти методы, широкое применение получили *феррографы, магнитометры*.

В зависимости от типа диагностируемого устройства, условий его нагружения и характера изнашивания проба масла может содержать частицы износа широкого размерного диапазона  $10^{-9}$ – $10^{-3}$  м. Поэтому проба масла проявляет свойства как коллоидных систем (т. е. для частиц дисперсной фазы характерно броуновское движение), так и свойства суспензий (существуют частицы дисперсной фазы, достаточно крупные, чтобы противостоять броуновскому движению).

В смазочных маслах, эксплуатирующихся в железосодержащих парах трения, могут присутствовать как ферромагнитные компоненты, такие как  $\alpha$ -Fe,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , так и парамагнитные соединения железа –  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}$ .

Поведение ферро- и парамагнитных частиц изнашивания в пробе масла при наложении магнитного поля (МП) определяется магнитными свойствами частиц.

При достаточно малом размере ( $\leq 10^{-7}$  м) ферромагнитные частицы являются единичными доменами, т. е. постоянными диполями. Частицы парамагнитных соединений железа и крупные ферромагнитные частицы не имеют постоянного магнитного момента, но приобретают наведенный момент во внешнем МП. Внешнее магнитное поле стремится упорядочить направление магнитных моментов (выстроить магнитные моменты вдоль поля).

Между частицами износа с магнитными моментами  $\vec{\mu}_i$  и  $\vec{\mu}_j$ , разделенными расстоянием  $\vec{r}_{ij}$ , возникает диполь-дипольное взаимодействие, энергия которого определяется выражением

$$U_M = \vec{\mu}_i \vec{\mu}_j \vec{r}_{ij}^{-3} [\cos(\theta_i - \theta_j) - 3 \cos\theta_i \cos\theta_j],$$

где  $\theta_i, \theta_j$  – углы между  $\vec{\mu}_i$  и  $\vec{r}_{ij}$  и  $\vec{\mu}_j$  и  $\vec{r}_{ij}$ .

Если предположить, что обе частицы имеют одинаковые моменты  $\vec{\mu}_i = \vec{\mu}_j = \vec{\mu}$  и ориентированы вдоль вектора напряженности внешнего поля, т. е.  $\theta_i = \theta_j = \theta$ , то

$$U_M = -\mu^2 r^{-3} (3\cos^2\theta - 1).$$

Эта энергия имеет минимум при  $\theta = 0$ . Следовательно, во внешнем поле, т. е. при намагничивании, энергетически более выгодно такое взаимное расположение частиц, когда их моменты параллельны

и лежат на общей прямой, проходящей через центры диполей. Это ведет при относительно низкой концентрации ( $< 1$  мас. %) и отсутствии других видов взаимодействия к образованию цепочек, ориентированных вдоль поля.

В общем случае поведение частиц износа и характер структурообразования определяются соотношением энергий диполь-дипольного взаимодействия, броуновского движения, взаимодействия адсорбционных слоев и молекулярного взаимодействия.

Частицы износа, вступая во взаимодействие с молекулами масла, покрываются адсорбционными слоями толщиной  $\delta$ , что приводит к снижению степени коагуляции частиц. В процессе броуновского движения, или под воздействием внешних сил, происходит деформирование адсорбционных слоев и частицы сближаются на расстояние  $< 2\delta$ . При этом действует механизм стерического отталкивания частиц, препятствующий их дальнейшему сближению.

Кроме того, между частицами действуют силы притяжения Ван-дер-Ваальса (молекулярное взаимодействие), величина которых зависит от диэлектрических свойств частиц и жидкой основы. Однако энергия молекулярного взаимодействия значительно меньше энергии других видов, и ею можно пренебречь.

В *однородном* внешнем МП и отсутствии других внешних воздействий в случае мелких частиц ( $< 10^{-8}$  м) длина цепочек ограничивается стерическим отталкиванием и броуновским движением. В относительно сильных полях (достаточных для ориентации магнитных диполей) энергия магнитного взаимодействия крупных частиц ( $> 10^{-6}$  м) значительно превышает энергию броуновского движения, и, если она превышает энергию стерического отталкивания, начинается образование цепочек, длина которых ограничивается лишь размерами кюветы.

В *неоднородном* МП поведение частиц износа в смазочном масле изменяется (рисунок 1). Неоднородность магнитного поля должна быть такой, чтобы, с одной стороны, осевая компонента напряженности  $H_z$  значительно превосходила радиальную  $H_r$  (см. рисунок 1, *a*), а с другой – радиальный градиент напряженности  $\text{grad}_r H$  должен значительно превосходить осевой градиент  $\text{grad}_z H$ .

Для создания такого неоднородного магнитного поля можно использовать соленоид с отношением внутреннего диаметра к высоте, равным 0,35.

В неоднородном МП, как и в однородном, образуются цепочки, ориентированные вдоль оси  $Z$ .

Однако в отличие от однородного МП длина цепочек крупных частиц в неоднородном МП ограничивается величиной градиента в радиальном направлении. Кроме того, градиент МП в радиальном направлении обуславливает наличие силы, стремящейся удалить цепочки из осевой зоны к периферии (величина напряженности в осевой зоне меньше, чем на периферии).

Таким образом, когда ячейка с маслом, содержащим ферромагнитные частицы, помещается в неоднородное МП, частицы, формируя цепочки, смещаются от оси ячейки к периферии (см. рисунок 1, а, б).

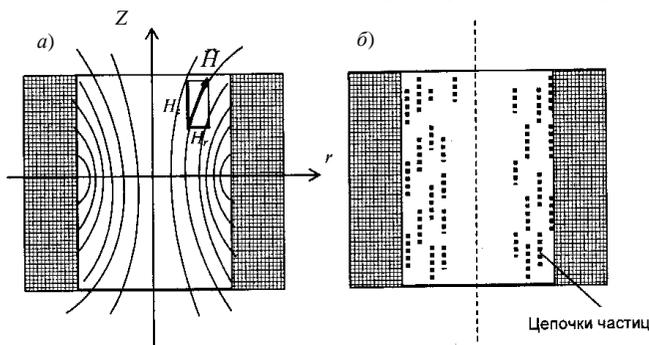


Рисунок 1 – Неоднородное поле соленоида (а) и расположение в нем ферромагнитных частиц (б)

При наложении магнитного поля, интенсивность оптического излучения, проходящего вдоль геометрической оси магнитной системы, совпадающей с осью ячейки, увеличивается, т. е. под действием МП оптическая плотность масла изменяется, причем величина этого изменения пропорциональна содержанию ферромагнитных частиц в анализируемом масле.

В общем случае оптическую плотность масла можно определить как

$$D = k_{\lambda} l = \ln(I_{01}/I_{02}), \quad (1)$$

где  $k_{\lambda}$  – коэффициент поглощения масла на длине волны  $\lambda$ ;

$l$  – длина оптического пути в среде;

$I_{01}, I_{02}$  – интенсивности падающего на поверхность масла и прошедшего излучения соответственно.

Обозначая через  $F$  – поток оптического излучения;  $A$  – площадь

облучаемой поверхности;  $U$  – напряжение на выходе фотоприемника;  $S$  – интегральную чувствительность фотоприемника и, учитывая, что  $I = F/A$  и  $U = FS$ , формулу (1) можно представить как

$$D = \ln(U_{01}/U_{02}). \quad (2)$$

Общую загрязненность масла, определяемую как разность оптической плотности работавшего и чистого масел, можно рассчитать по формуле

$$\Delta D_{\Sigma} = D_2 - D_1 = \ln(U_0/U_2) - \ln(U_0/U_1) = \ln(U_1/U_2), \quad (3)$$

где  $D_1, D_2$  – оптические плотности чистого и работавшего масла соответственно;

$U_0$  – напряжение на выходе фотоприемника при отсутствии масла в ячейке;

$U_2$  – напряжение на выходе фотоприемника после заполнения ячейки работавшим маслом;

$U_1$  – напряжение на выходе фотоприемника после заполнения ячейки чистым маслом.

Загрязненность масла ферромагнитными частицами, определяемую как разность оптической плотности работавшего масла при наличии магнитного поля и без него, можно рассчитать по формуле

$$\Delta D_{\Phi} = D_2 - D_{2*} = \ln(U_1/U_2) - \ln(U_1/U_{2*}) = \ln(U_{2*}/U_2), \quad (4)$$

где  $D_{2*}$  – оптическая плотность работавшего масла при воздействии на него магнитным полем;

$U_{2*}$  – напряжение на выходе фотоприемника при воздействии на пробу работавшего масла магнитным полем.

## 2 Оборудование и приборы

В работе используются оптико-магнитный детектор (ОМД) и набор проб смазочных масел [2, 3].

ОМД состоит из механического *I* и электронного *II* блоков (рисунок 2). Механический блок включает в себя: источник оптического излучения *1*, фотоприемник *б* с предусилителем, оптическую передающую *2*, *5* и магнитную *3* системы и кювету с пробой масла *4*.

Для обеспечения прохождения оптического излучения через темные (сильно загрязненные) масла в качестве источника излучения ис-

пользуется ИК-диод с максимальной мощностью излучения на длине волны  $\lambda = 1$  мкм. В фотоприемном блоке используется фотодиод ФД-27, имеющий максимум спектральной чувствительности на этой же длине волны. Магнитная система создает неоднородное МП, воздействующее на пробу масла.

Электронный блок состоит из амплитудного детектора 11, регистрирующего устройства 12, формирователя импульсов 8, регулятора мощности излучения 7 и блока питания 9.

Формирователь импульсов преобразует напряжение блока питания в импульсы частотой 2 кГц, скважностью 20–30 %, амплитудой 2 В. Это позволяет получить на выходе ИК-диода импульсы мощностью 20 мВт.

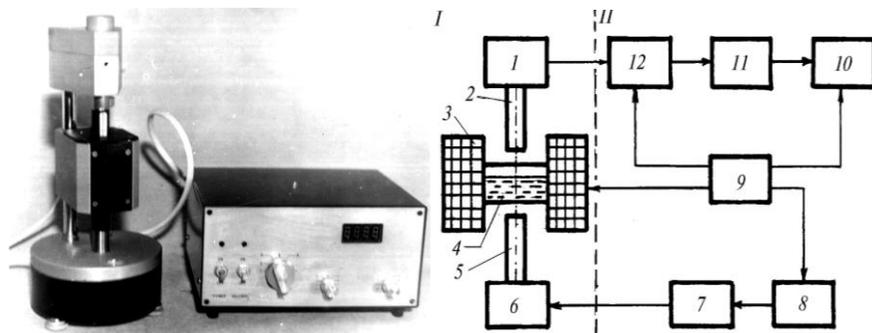


Рисунок 2 – Внешний вид (а) и блок-схема ОМД (б)

Перед подачей на ИК-диод импульсы с формирователя проходят регулятор мощности излучения (регулировка осуществляется посредством изменения амплитуды импульсов). Импульсное оптическое излучение, пройдя через кювету с пробой масла, попадает на фотодиод, где преобразуется в импульсный электрический сигнал. Далее сигнал усиливается с помощью предусилителя, коэффициент усиления которого регулируется в пределах 1–200. Усиленный сигнал проходит амплитудный детектор и фильтр, которые служат для выпрямления сигнала. Затем сигнал поступает на регистрирующее устройство – аналого-цифровой преобразователь с цифровой индикацией.

На рисунке 3 показана передняя панель ОМД, на которой расположены ручки управления прибором.

Пробы масел готовят путем взвешивания порошка карбонильного железа дисперсностью 0,5–12 мкм на торсионных весах и последующим размешиванием порошка железа в масле (моторное, авиаци-

онное, промышленное) объемом 100 мл. Пробу масла нагревают до 60 °С и хорошо перемешивают. Пробки имеют различное содержание ферромагнитных частиц – 0,005; 0,001; 0,05; 0,01; 0,20 мас. %. Объем исследуемой пробы масла составляет  $\approx 1,0 \dots 2,5$  мл. При этом толщина слоя масла в измерительной кювете  $\approx 0,2 \dots 0,6$  см.

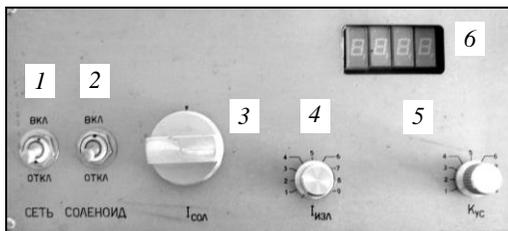


Рисунок 3 – Передняя панель ОМД:

1 – тумблер включения питания прибора; 2 – тумблер включения питания обмотки соленоида; 3 – регулятор тока соленоида; 4 – регулятор интенсивности светового потока; 5 – регулятор коэффициента усиления; 6 – цифровой индикатор

### 3 Порядок выполнения работы

#### 3.1 Определение содержания в масле ферромагнитных частиц

1 Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации ОМД. Включить тумблером 1 ОМД в сеть.

2 Поместить в зону контроля измерительную ячейку без масла. Установить потенциометр 4, регулирующий интенсивность светового потока  $I$ , в начальное положение. Измерить напряжение  $U_0$  на выходе фотоприемника.

3 Взять пробу чистого масла. Налить масло в измерительную кювету и поместить последнюю в ОМД. Измерить напряжение  $U_1$  на выходе фотоприемника. В случае, если значение напряжения  $U_1$  мало (для темных масел), увеличить интенсивность светового потока потенциометром 5.

4 Взять масло с известным содержанием ферромагнитных частиц. Налить его в измерительную кювету и поместить последнюю в ОМД. Измерить напряжение  $U_2$  на выходе фотоприемника.

5 Не вынимая из ОМД ячейки с маслом, содержащим ферромагнитные частицы, тумблером 2 включить соленоид, потенциометром 3 установить минимальное значение тока в обмотке соленоида и измерить напряжение  $U_{2*}$  на выходе фотоприемника.

**Внимание!** После проведения измерения питание соленоида

*необходимо отключить, чтобы исключить перегрев обмотки соленоида.*

6 Полученные данные занести в таблицу 1. По формулам (1)–(4) провести расчеты оптической плотности масла. Построить зависимости  $\Delta D_{\Sigma}(C)$ ,  $\Delta D_{\Phi}(C)$ .

Таблица 1 – Результаты измерений и расчетов

| Номер пробы | С, мас. % | $U_0$ | $U_1$ | $U_2$ | $U_{2*}$ | $\Delta D_{\Sigma}$ | $\Delta D_{\Phi}$ |
|-------------|-----------|-------|-------|-------|----------|---------------------|-------------------|
|             |           | мВ    |       |       |          |                     |                   |
| 1           |           |       |       |       |          |                     |                   |
| ...         |           |       |       |       |          |                     |                   |
| 5           |           |       |       |       |          |                     |                   |

### 3.2 Диагностика загрязненности смазочных масел частицами износа

Триботехнические испытания проводят на машине трения 2070 СМТ-1. Исследуют процесс изнашивания пары трения «вал – частичный вкладыш».

- 1 По указанию преподавателя выбрать исследуемое масло.
- 2 Налить масло в ванночку 3 и погрузить в нее часть вала 2.
- 3 Прижать частичный вкладыш 1 к валу 2 с усилием, регулируемым устройством нагружения 4 (рисунок 4). Привести вал во вращательное движение двигателем 9.

Скорость скольжения устанавливают путем изменения числа оборотов двигателя 9 и регистрации величины скорости датчиком 8 (нагрузка и скорость вращения задается преподавателем).

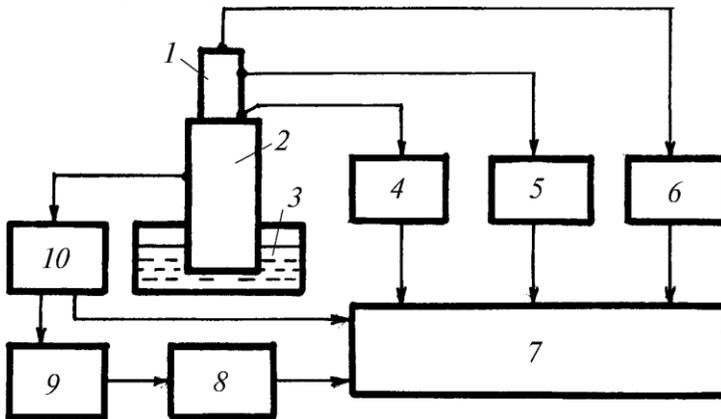


Рисунок 4 – Блок-схема испытательной установки:

1 – частичный вкладыш; 2 – вал; 3 – ванночка с маслом; 4, 5 – датчики температуры и линейного износа; 6 – устройство нагружения; 7 – пульт управления; 8 – датчик

скорости; 9 – двигатель; 10 – датчик температуры

**Пример.** Материал вкладыша – сталь 45 (незакаленная ; закаленная, 45–50HRC). Смазывание осуществляют маслом И-20А (МС-20). Скорость скольжения  $v = 0,5$  м/с, площадь контакта  $S = 2$  см<sup>2</sup>, давление  $p$  изменяется ступенчато: 1,0; 2,0; 3,0 МПа.

4 В ходе эксперимента контролируют силу трения  $F$ , линейный износ  $l$ , температуру  $\theta$  в зоне трения.

5 Через заданные промежутки времени остановить машину трения и после размешивания масла в ванночке взять пробу масла объёмом  $V \approx 2,0$  мл. Добавить в ванночку чистое масло до первоначального объема ( $\approx 50 \dots 100$  мл) и продолжить испытания.

6 Взятые пробы исследовать на ОМД. При необходимости (высокая концентрация частиц) пробу масла разбавить чистым маслом в соотношении 1:1.

7 Провести измерения в соответствии с пп. 2–5 задания 3.1. Полученные данные занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты измерений и расчетов

| $t$ , ч | $p$ , МПа | $l$ , мкм | $\theta$ , °С | $F$ , Н | $C$ , мас. % |
|---------|-----------|-----------|---------------|---------|--------------|
|         |           |           |               |         |              |
|         |           |           |               |         |              |
|         |           |           |               |         |              |

8 По имеющимся градуировочным кривым определить содержание частиц износа в пробе масла и построить зависимости, аналогичные, приведенным на рисунке 5, а.

9 Построить зависимость, характеризующую изменение общей загрязненности масла  $\Delta D_{\Sigma}(C)$  во времени.

### Содержание отчета

Наименование и цель работы; объект исследования; схема ОМД; результаты выполненной работы; вывод; ответы на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

- 1 Описать поведение ферромагнитных частиц в однородном МП.
- 2 Описать поведение ферромагнитных частиц в неоднородном МП.
- 3 Сущность оптико-магнитного метода диагностики и область его применения.

- 4 Устройство и принцип действия ОМД.
- 5 Как определить оптическую плотность масла?
- 6 Как определить общую загрязненность масла?
- 7 Как определить загрязненность масла ферромагнитными частицами?
- 8 Порядок диагностирования масел с помощью ОМД.

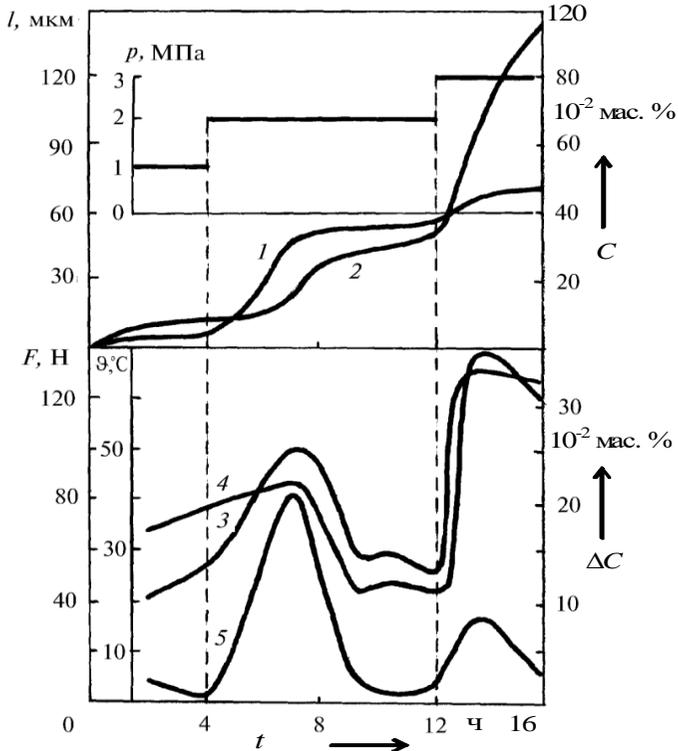


Рисунок 5 – Временные зависимости:  $a$  – концентрации частиц износа в пробе масла  $l$  и линейного износа  $2$ ;  $b$  – скорости изменения концентрации частиц  $3$ , температуры в зоне трения  $4$  и силы трения  $5$

#### Список литературы

- 1 **Акустические и электрические методы в триботехнике** / Н. К. Мышкин [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1987. – 280 с.
- 2 **Маркова, Л. В.** Портативный оптико-магнитный детектор и его использование для диагностики изнашивания / Л. В. Маркова, Ю. Е. Кирпиченко, О. В. Холодилов // Трение и износ. – 1997. – Т. 18. – № 2. – С. 224–228.
- 3 **Маркова, Л. В.** Трибодиагностика машин / Л. В. Маркова, Н. К. Мышкин. – Минск : Бел. наука, 2005. – 251 с.

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРАНИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ СЛОЁВ

**Цель работы.** Изучить устройство микротрибометра и методику определения прочностных свойств граничных смазочных слоёв.

### 1 Краткие сведения из теории

Основная функция смазочного материала – эффективное снижение энергетических потерь при трении контактируемых тел [1]. Это достигается за счет снижения прочности на сдвиг молекулярных связей смазочного материала. Ужесточение режимов работы современного оборудования, работающего при высоком контактном давлении, и частом изменении направления и скорости относительного перемещения, повышает требования к фрикционным свойствам смазочных материалов, особенно к граничным смазочным слоям (ГСС).

Правильный выбор смазочного материала является одним из основных условий его эксплуатационной надежности. ГСС – это полиили мономолекулярные слои толщиной  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  м адсорбированного на поверхности вещества [2]. Особенность этих слоёв объясняется их особым граничным состоянием в контактных зазорах молекулярного масштаба (нанометровый диапазон толщин) и свойствами, отличными от объемных свойств смазочных материалов.

Для машиностроения актуальна проблема объективной оценки эксплуатационных свойств смазочных материалов. При выборе смазочного материала фирмы потребители предъявляют повышенные требования к их прочностным свойствам. Прочностные свойства характеризуют способность смазочного материала разделять сопряжённые поверхности под действием контактного давления и, таким образом, предотвращать их заедание и задир. Экспериментальные данные по свойствам ГСС весьма ограничены. Прежде всего это касается возможности сохранения неразрывных ГСС при высоких контактных давлениях порядка  $10^7$ – $10^9$  Па.

Применение теории туннельной проводимости [3] к анализу контактного сопротивления  $R_c$  смазанного контакта позволяет сделать заключение о состоянии поверхности раздела, в частности, сплошно-

сти и толщине смазочных прослоек нанометрового диапазона толщин. Зависимости  $R_c(N)$ , регистрируемые при нормальном нагружении смазанного контакта, могут нести информацию о критических нагрузках разрушения  $N_{кр}$  структуры таких слоев.

### 1.1 Устройство микрофрибметра

Испытательный блок микрофрибметра обеспечивает возможность одновременной регистрации электрических и фрикционных характеристик при скольжении сферического образца диаметром 4 мм по плоскости (прямоугольная пластина 10×40 мм). Блок включает: термокамеру 3; механизм нагружения 4 (рисунок 1), с держателем 2 сферического образца, систему измерения силы трения 7; механизм перемещения 15 держателя плоского образца 1.

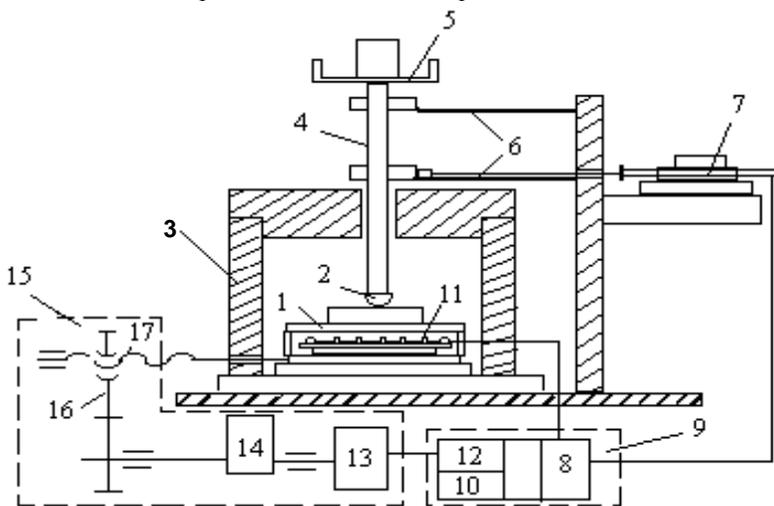


Рисунок 1 – Схема микрофрибметра

Нагрузка на сферический образец (0,1–3 Н) задается установкой соответствующих калиброванных грузов 5. Регистрация силы трения основана на измерении деформации упругих элементов 6, связанных с держателем сферического образца с помощью прибора 8 для измерения малых перемещений. Механизм перемещения создан на базе реверсивного двигателя 13 через кинематическую цепь, включающую редуктор 14, зубчато-ременную передачу 16, пару винт – гайка 17, обеспечивает возвратно-поступательное перемещение держателя

плоского образца с возможностью плавного регулирования скорости скольжения в диапазоне 12–300 мкм/с. Электронные блоки регулирования скорости перемещения *10* подвижного образца вмонтированы в пульт управления 9.

Измерение контактного сопротивления проводилось по четырехпроводной схеме [3] при наличии на разомкнутом контакте 50 мВ и величине тока через замкнутый контакт < 1 мА, что предотвращает пробой смазочных сред. Регистрация проводимости и силы трения осуществлялась синхронно при помощи ЭВМ типа IBM PC (рисунок 2).

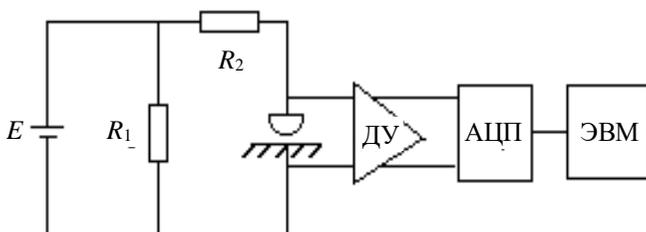


Рисунок 2 – Электрическая четырехпроводная схема и схема регистрации данных:

*E* – источник напряжения; *R*<sub>1</sub> – калибровочное сопротивление;  
*R*<sub>2</sub> – магазин сопротивлений; ДУ – дифференциальный усилитель;  
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь;  
 ЭВМ – электронно-вычислительная машина

## 1.2 Методика определения прочностных свойств ГСС

Выделяют номинальную, контурную и фактическую площадь контакта [4]. Под номинальной площадью контакта *A*<sub>а</sub> (рисунок 3) понимают площадь, по которой соприкасались бы тела, если бы их поверхности имели идеально гладкую геометрическую форму.

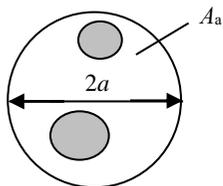


Рисунок 3 – Площадь контакта шероховатых тел

Расчет номинальной площади контакта осуществляется из классической теории Герца. Радиус пятна контакта *a* оценивается из соотношений для упругой (1) деформации тел, он определяется величиной нагрузки *N*, механическими свойствами тел и их геометрическими размерами:

$$a = 1,11 \left( \frac{Nr}{E} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где *r* – радиус сопряжённых тел;

$E$  – приведенный модуль упругости тел.

Известно, что поверхность контакта является источником сопротивления стягивания

$$R_s = \frac{\rho}{2a}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление;

$a$  – радиус пятна контакта.

В случае неподвижного номинально точечного контакта благородных металлов, когда смазочный материал вытеснен из контактного зазора, контурная и фактическая площади совпадают. Номинально точечный контакт имеет лишь одну контурную площадку, размеры которой оценивают аналитически, исходя из теории Герца.

Сопротивление в контакте определяется согласно теории Хольма суммой  $R_s$  (сопротивление стягивания линий тока из объема материала к контурной площади) и сопротивлением пятен кластеров  $R_\alpha$ , обусловленным стягиванием линий тока к фактическим пятнам контакта:

$$R_s = \frac{\rho}{2na}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление;

$n$  – число пятен фактического контакта;

$a$  – радиус пятна кластера.

При наличии в зоне контакта сплошной смазочной прослойки его сопротивление определяется в основном туннельной проводимостью:

$$R_t = \left( \frac{10^{-14} d}{a^2 \phi^{1/2}} \right) \exp(10,24 \phi^{1/2} d), \quad (4)$$

где  $d$  – толщина ГСС;

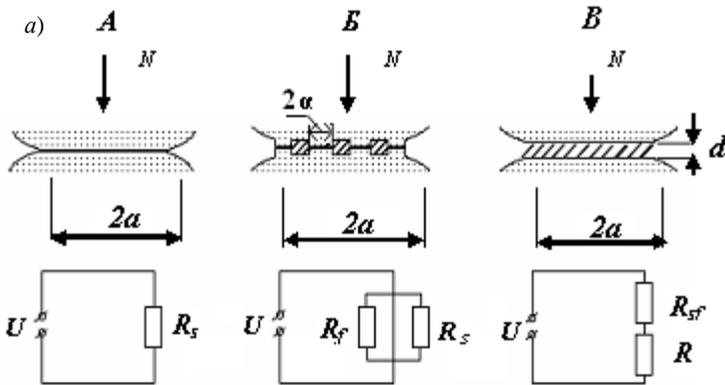
$a$  – радиус пятна контакта;

$\phi$  – эффективная работа выхода электрона.

Оценка прочностных свойств поверхности раздела осуществляется с использованием анализа моделей поверхности раздела.

В случае «сухого» контакта (*A*) благородных материалов контактное сопротивление определяется сопротивлением стягивания линий тока из объема образца к пятну контакта (рисунок 4).

Благородный металл



Окисляющийся металл

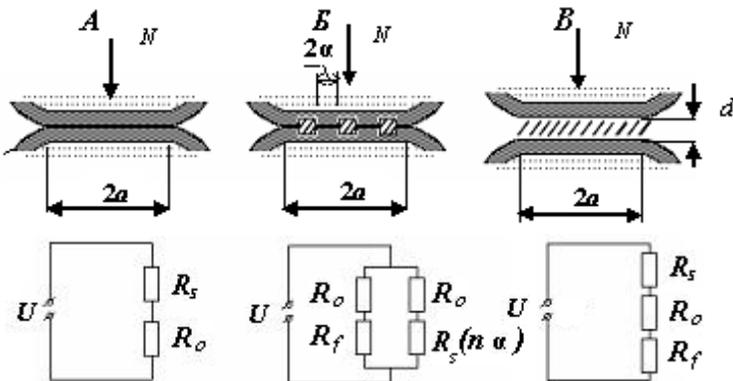


Рисунок 4 – Модели поверхности раздела (*a*) и схемы замещения (*б*) точечного смазанного контакта

При наличии в зоне контакта несплошной смазочной прослойки (*B*), его сопротивление определяется одновременно ситуочной, через пятна микроконтакта, и туннельной проводимостями (*B*).

При наличии на поверхности металла оксидных пленок контактное сопротивление определяется суммой сопротивлений стягивания

$R_s$ , ситочного  $R_a$  (через пятна фактического контакта) и  $R_f$  (оксидной пленки):

$$R_f = \frac{\sigma}{\pi a^2}. \quad (5)$$

Практическим назначением ГСС является разделение контактирующих поверхностей тонким зазором, выдерживающим высокие контактные давления. В связи с этим при проведении экспериментов реализовывались области с высоким средним контурным контактным давлением до 800 МПа. Для зонда (ШХ-15) и подложки (сталь 65Г) критическая нагрузка  $N_{кр} = 11,7$  Н, а реализуемая в эксперименте область нагрузок значительно меньше  $N_{кр}$  и составляет 0,1–3,0 Н, т. е. имеет место упругий контакт контактирующих поверхностей.

Для расчета среднего контурного давления зонда на исследуемый поверхностный слой необходимо определить радиус контакта, который определяется из классической теории Герца (1).

Схема оценки прочностных свойств ГСС приведена на рисунке 5.

Прочностные свойства ГСС и электрофизические свойства поверхностных слоев оцениваются в статике из анализа зависимостей  $R_c(p)$  (рисунок 6).

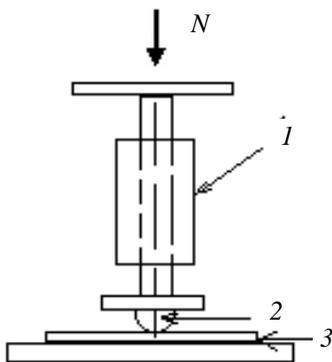


Рисунок 5 – Схема проведения эксперимента для оценки прочностных свойств поверхностных слоев:

1 – узел нагружения; 2 – зонд в виде сферы; 3 – подложка с нанесённым смазочным материалом

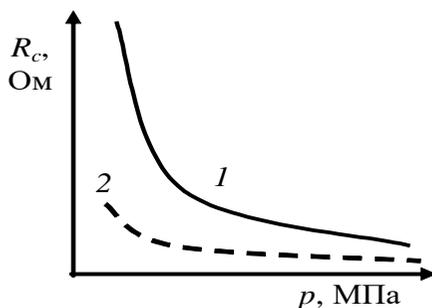


Рисунок 6 – Характерный вид зависимости контактного сопротивления  $R_c$  поверхностных слоев от контактного давления  $p$ : 1 – исследуемый ГСС; 2 – сопротивление стягивания материала подложки

Для получения статистически достоверных результатов в различных точках поверхности (как правило, не менее 10 точек) при заданной нагрузке измеряется  $R_c$ .

Для изучения прочностных и электрофизических свойств граничных смазочных и поверхностных слоев используется микротрибометр ММТ.

В таблице 1 приведены результаты оценки прочностных свойств различных смазочных сред: вазелиновое масло (ВМ), олеиновая кислота (ОК), дипроксамин (Д157), вазелиновое масло с добавкой 1 мас. % олеиновой кислоты (ВМ+ОК), эпилам (6СФК), пластичные смазки, загущенные стеаратом, оксистеаратом и 12-оксистеаратом лития (LiSt, LiOSt, 12OHLiSt) и полимочевинной (ПМ), полученные обработкой зависимостей  $R_c(N)$  при взаимодействии нормально нагруженного золотого зонда с поверхностью подложки из стали.

Таблица 1 – Прочностные характеристики смазочных материалов

| Смазочная среда          | Регистрируемые характеристики |                |                                 |                                     |
|--------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------------------|-------------------------------------|
|                          | $N_{кр}$ , сН                 | $p_{кр}$ , МПа | $R_{с\ кр}$ , мОм               | $R_{с\ мин}$ , мОм                  |
| Без смазочного материала | 0,15–0,25                     | 1,2–1,9        | $10^2$ – $2 \cdot 10^3$         | 3–10                                |
| Вазелиновое масло (ВМ)   | 0,15–0,25                     | 1,2–1,9        | $10^2$ – $10^3$                 | 5–10                                |
| Олеиновая кислота (ОК)   | 0,2–0,3                       | 1,8–2,5        | $6 \cdot 10^2$ – $2 \cdot 10^6$ | 3–10                                |
| ВМ+1 % ОК                | 0,3–2,1                       | 2,3–16,1       | $5 \cdot 10^2$ – $10^6$         | 10–17                               |
| Дипроксамин (Д157)       | 0,2–1,7                       | 1,5–13,1       | $10^2$ – $10^4$                 | 8–12                                |
| Эпилам (6СФК)            | 0,6–4,2                       | 4,6–32,3       | $10^2$ – $10^4$                 | 10–45                               |
| ДОС-Д157+LiSt            | 7,7–11,5                      | 58–85          | $10^5$ – $10^7$                 | $10^3$ – $2 \cdot 10^3$             |
| ДОС-Д157+LiOSt           | 10–60                         | 77–460         | $5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^6$ | $3 \cdot 10^2$ – $3 \cdot 10^4$     |
| ДОС-Д157+10 % OHLiSt     | 13–60                         | 100–460        | $10^6$ – $10^7$                 | $2,5 \cdot 10^3$ – $2,5 \cdot 10^5$ |
| ДОС-Д157+10 % ПМ         | 60                            | 460            | –                               | –                                   |

Испытывавшиеся смазочные среды по прочностным свойствам можно расположить в следующем порядке: жидкости ВМ, ОК, Д157, ВМ+ОК, 6СФК, смазки загущенные LiSt, LiOSt, 12OHLiSt, ПМ.

## 2 Оборудование, принадлежности, образцы

В работе используются микротрибометр, пробы смазочных материалов, подложка из стали, зонд, ацетон, ветошь, пипетка.

## 3 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с устройством и методикой измерения прочностных свойств ГСС.

2 Рассчитать радиус контакта по формуле (1), принимая радиус шарика  $r = 2 \cdot 10^{-3}$  м; модуль упругости стали  $E = 2,6 \cdot 10^{11}$  Па, контактная нагрузка  $N$  берется в ньютонах.

3 Рассчитать площадь контакта  $S$  по формуле

$$S = \pi a^2 . \quad (6)$$

4 Рассчитать контактное давление при  $N = 5, 20, 50, 100, 150$  сН (где  $1 \text{ сН} = 10^{-2} \text{ Н}$ ), заполнить таблицу 2.

*Таблица 2 – Зависимость параметров контакта стального шарика от нагрузки*

| Нагрузка, Н | Радиус контакта $a$ , мкм | Площадь контакта $S$ , м <sup>2</sup> | Среднее контактное давление $p$ , МПа |
|-------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1           |                           |                                       |                                       |
| 2           |                           |                                       |                                       |
| 3           |                           |                                       |                                       |

5 Тумблер «Сеть» источника питания переключить в положение «Вкл.». При этом должна загореться сигнальная лампочка.

6 Перевести источник питания в режим источника тока путём установления максимального значения напряжения переключателем на передней панели прибора и задания требуемого значения тока (50 мА).

7 Тумблер «Сеть» вольтметра переключить в положение «Вкл.», выбрать ручкой переключателей диапазонов измеряемое значение напряжения, максимальное значение напряжения которого составляет 50 мВ.

8 Проверить правильность работы электрической схемы путём поднятия зонда и измерения контактной разности потенциалов, которая должна составлять 50 мВ.

9 Опустить зонд на плоскость учитывая, что вес чаши, на которую устанавливается нагрузка, составляет 20 сН и измерить контактную разность потенциалов. Поднять зонд, переместить подложку на 1–2 мм, вращая колесо привода, опустить зонд на плоскость.

10 Повторить предыдущий п. 4 раза.

11 Определить по таблице соответствие измеряемой контактной разности потенциалов значение контактного сопротивления без нагрузки.

12 Поднять зонд. Установить нагрузку 30 сН (10 г). Повторить пункты 9–11.

13 Прodelать аналогичные действия для нагрузок 50 сН (30 г), 100 сН (80 г), 150 сН (130 г).

14 Нанести на подложку исследуемый смазочный материал и повторить пункты 12–16.

15 Смыть исследуемый смазочный материал с подложки и зонда, используя для этого органический растворитель (ацетон или спирт). Протереть зонд и подложку сухой ветошью.

16 Полученные данные занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Зависимость измеряемого контактного сопротивления  $R_c$  от контактного давления

| Смазочный материал | Нагрузка $N, Н$ | Среднее контактное давление $p$ , МПа | Контактное сопротивление $R_c$ , Ом | Критическое значение контактного давления $p_{кр}$ , МПа | Критическое значение* контактного сопротивления $R_{c\ кр}$ , Ом |
|--------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| 1                  |                 |                                       |                                     |  |  |
| 2                  |                 |                                       |                                     |  |  |
| 3                  |                 |                                       |                                     |  |  |

\* Значение контактного сопротивления  $R_c$ , при котором оно снизилось до значения, характерного для «сухой» поверхности, является критическим значением  $R_{c\ кр}$ .

17 Построить зависимость контактного сопротивления от среднего контактного давления соответственно при нагрузках 0, 10, 30, 80, 130 г для «сухой» поверхности.

18 Построить зависимость  $R_c$  от среднего контактного давления  $p$  при нагрузках 0, 10, 30, 80, 130 г для исследуемых смазочных материалов.

19 Исходя из зависимостей  $R_c(p)$  определить критическую нагрузку (давление) разрушения ГСС для каждого смазочного материала.

20 Расположить исследуемые смазочные материалы в ряд по убыванию прочностных свойств.

### Содержание отчета

Наименование и цель работы. Краткое описание микротрибометра, электрической схемы и методики измерения. Результаты измерений контактного сопротивления исследуемых смазочных сред и определение прочностных свойств исследуемых ГСС. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1 Описать методику определения радиуса, площади контакта и среднего контактного давления.

2 Изобразить электрическую схему измерения контактного сопротивления.

3 Описать модели поверхности раздела контакта и чем определяется значение контактного сопротивления для каждой из них.

4 Как связана толщина граничного смазочного слоя и величина измеряемого контактного сопротивления?

5 Чем определяется значение контактного сопротивления в случае благородного и окисляющегося металлов?

6 Сущность метода оценки прочностных свойств граничных смазочных слоёв с использованием электрофизического зондирования.

7 Как определить критическое значение контактного давления  $P_{кр}$ , при котором происходит разрушение граничных смазочных слоёв?

#### Список литературы

1 **Богданович, П. Н.** Трение и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак – Минск : Выш. шк., 1999. – 374 с.

2 **Ахматов, А. С.** Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 389 с.

3 **Хольм, Р.** Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Изд-во «Иностранная литература», 1961. – 464 с.

4 **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 525 с.

### Лабораторная работа № 5

## ОЦЕНКА ПРОТИВОЗАДИРНЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы.** Изучить устройство трибометра и методику определения противозадирных свойств граничных смазочных слоёв.

### 1 Краткие сведения из теории

Основная функция смазочного материала (СМ) состоит в образовании тонкой ( $\approx 10^{-9}$  м) прочной пленки смазочного материала на поверхностях трущихся деталей, исключаящей прямой контакт между микронеровностями, а также снижении износа сопряженных поверхностей за счет низкой прочности на сдвиг между молекулами СМ [1]. Состояние граничного смазочного слоя (ГСС) определяет

противозадирные свойства СМ и, в конечном счете, долговечность и надёжность узла трения.

Существует большое количество способов оценки трибологических характеристик СМ, однако анализ научно-технической литературы показывает, что при испытаниях по оценке противозадирной стойкости моторных и трансмиссионных масел имеется ряд проблем.

1 Подбор смазочного материала и оценка его триботехнической эффективности производятся посредством лабораторных, стендовых и пробеговых испытаний на полигоне, что требует значительных материальных и временных затрат. При этом нагрузочно-скоростные режимы лабораторных испытаний стремятся привести в соответствие с условиями, реализуемыми при эксплуатации узлов трения. Однако получаемые результаты не всегда согласуются с результатами стендовых и пробеговых испытаний. Триботехнические характеристики – индекс задира, нагрузка сваривания, показатель износа при осевой нагрузке, определяемые на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75, нормированы стандартами и техническими условиями на моторные масла для контроля процесса производства. Однако непосредственную связь между оценкой противоизносных и противозадирных свойств, полученной при испытаниях, и фактическими противоизносными свойствами моторных масел в реальных условиях применения установить не всегда возможно. Так, например, при испытаниях моторных масел противоизносные свойства масел оценивают по потере массы поршневых колец, задиру или питтингу кулачков и толкателей, линейному износу этих деталей и цилиндров, состоянию поверхностей трения. Кроме того, данный способ не возможно использовать в реальных узлах трения для их оперативной диагностики.

2 Использование импортных СМ в узлах отечественной техники осуществляется не всегда корректно, поскольку имеет место несовпадение методик оценки триботехнических характеристик масел, поскольку отечественные и зарубежные стенды имеют существенные отличия как по конструкции, так и по условиям проведения испытаний.

Для оценки противозадирных свойств Европейским координационным советом стандартизован метод СЕС-07А-85 и используется стенд FZG (DIN 51354). В Великобритании

используется аналогичный метод испытаний и стенд IAE (IAE-test в соответствии с IP 166).

В США используется стенд Rider (ASTM D 1947). Нагружение на всех стендах ведут последовательно до наступления заедания. Для анализа эксплуатационных свойств трансмиссионных масел используют ведущий мост армейского грузовика «Dodj» (CRC-L-37). Испытания ведут на новом комплекте шестерен. Противозадирные свойства при высоких скоростях и больших ударных нагрузках оценивают на ведущем мосту автомобиля «Spiser» (CRC-L-42). Разнообразие лабораторных методов исследования и дорогостоящих стендовых испытаний масел с учетом различных спецификаций отдельных фирм-производителей техники: Volvo, Ford, Mercedes-Benz, MAN, Mack и др., не дает возможности однозначной трактовки противозадирных свойств используемых масел.

В этой связи необходимо разрабатывать и использовать инвариантные, не изменяющиеся от схемы и режимов испытаний, критерии и характеристики для оценки противозадирной стойкости СМ.

Зависимости коэффициента трения  $f$ , контактного сопротивления  $R_c$  и температуры  $T$ , от нагрузки  $N$  при динамическом смазанном контакте, могут нести информацию о критических нагрузках  $N_{кр}$  разрушения структуры таких слоев [2]. Комплексный анализ данных зависимостей от контактной нагрузки позволяет делать заключение о противозадирной стойкости исследуемых СМ.

### **1.1 Установка для оценки противозадирных свойств масел**

Противозадирные свойства смазочных материалов исследуются по схеме «вал – частичный вкладыш» на машине СМТ-1 и оцениваются по зависимостям момента трения, контактного сопротивления, температуры от нагрузки. Доставка СМ в зону контакта осуществляется путём непосредственного погружения ролика в ванночку с исследуемым маслом (рисунок 1).

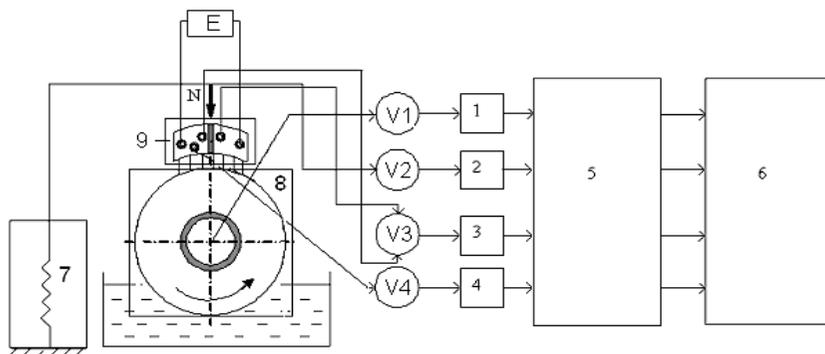


Рисунок 1 – Блок-схема устройства:

1, 2, 3, 4 – регистрирующее устройство – самописец; V1 – вольтметр, регистрирующий нагрузку в контакте; V2 – вольтметр, регистрирующий момент трения; V3 – вольтметр, регистрирующий контактную разность потенциалов; V4 – вольтметр, регистрирующий термоЭДС; 5 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 6 – персональная электронная вычислительная машина (ПЭВМ); 7 – блок нагружения образцов; 8 – блок привода и измерения момента трения; 9 – источник постоянного напряжения

Линейная скорость относительного перемещения ролика составляет 0,5 м/с. Площадь сегмента –  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Поверхности сегментов и роликов (сталь 45) предварительно шлифуются и полируются до 12-го класса шероховатости ( $R_a \approx 0,02...0,04 \text{ мкм}$ ). Номинальное контактное давление находится в диапазоне 0,5–10 МПа. Объёмная температура в области трения регистрируется протарированной термопарой, помещенной на расстоянии 2 мм от контактной поверхности сегмента. Погрешность измерения коэффициента трения составляет  $\pm 0,01$ . Процесс снятия контролируемых параметров: момент трения, контактное сопротивление, температура и анализ информации осуществляется с использованием ПЭВМ.

Измерение контактного сопротивления проводилось по четырехпроводной схеме [3] при напряжении на разомкнутом контакте 50 мВ и токе через замкнутый контакт  $< 1 \text{ мА}$ , что предотвращает пробой смазочных материалов. Регистрация проводимости и силы трения осуществляется синхронно при помощи ПЭВМ (рисунок 2).

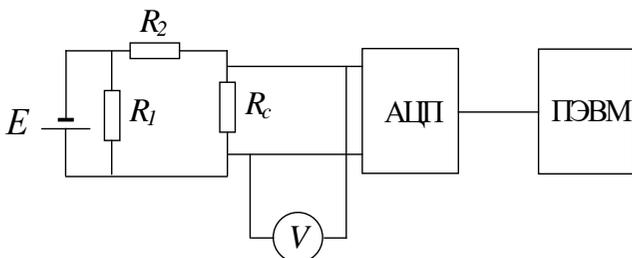


Рисунок 2 – Четырёхпроводная электрическая схема регистрации контактного сопротивления:

$E$  – источник тока;  $R_1$  – калибровочное сопротивление;

$R_2$  – магазин сопротивлений;  $R_c$  – измеряемое контактное сопротивление

## 1.2 Физические основы методики определения противозадирных свойств смазочных материалов

Физической основой методики является то, что толщина ГСС в зоне трения определяет величину тока между контактными поверхностями тел и контактного сопротивления  $R_c$ . Формирование и разрушение ГСС, фазовый переход первого рода от физической адсорбции к хемосорбции и другие процессы приводят к изменению его структуры и толщины и, следовательно, величины контактного сопротивления. Увеличение давления и срабатывание присадок приводит вначале к утончению ГСС и снижению контактного сопротивления. В дальнейшем нарушение сплошности ГСС и появление металлических микропятен в зоне трения вызывают снижение величины контактного сопротивления до уровня металлической проводимости, характерной для «сухого» контакта без СМ.

Например, для схемы испытаний ролик (ШХ 15) – сегмент (ШХ 15) контактное сопротивление составляет 0,010–0,005 Ом. Появление частиц износа при критической нагрузке в зоне трения и разделение ими контактных поверхностей обуславливает скачкообразное увеличение флуктуаций верхнего уровня величины контактного сопротивления до  $10^7$  Ом (верхний предел измерения  $R_c$  электрической схемы), а также момента трения и температуры.

Особенность применяемой методики – то, что регистрация контактного сопротивления ГСС в режиме реального времени позволяет точно определить его состояние и момент разрушения, а также осуществлять диагностирование состояния трибосопрежения и управ-

лять режимами его эксплуатации.

Имеющее место снижение сопротивления стягивания  $R_c$  до уровня расчетного ( $\approx 1$  МОм) означает разрушение хемосорбированного слоя, а также оксидной пленки и появление металлического контакта между сопряженными поверхностями. Нарушение сплошности слоя приводит к заеданию и задиру поверхностей трения, сопровождающимся локальным во времени интенсивным изнашиванием контактирующих тел.

**Пример.** Оценим противозадирные свойства вазелинового масла. Критическая нагрузка для него составляет 900 Н, температура –  $\approx 250$  °С, коэффициент трения –  $\approx 0,47$ .

Образование частиц износа между контактными поверхностями приводит к их разделению, что сопровождается резким увеличением контактного сопротивления  $R_{c\max} = 10^7$  Ом.

*1 Расчет контактного давления при контактном взаимодействии тел по схеме «вал – частичный вкладыш».*

Оценка среднего номинального контактного давления осуществляется по формуле [4]:

$$p = N/S, \quad (1)$$

где  $N$  – нагрузка, Н;

$S$  – площадь сегмента или частичного вкладыша, м<sup>2</sup>.

В таблице 1 приведена оценка значений верхней границы номинального контактного давления.

**Таблица 1 – Расчет верхней границы номинального контактного давления при контакте тел по схеме «вал – частичный вкладыш»**

| Нагрузка<br>$N$ , Н | Верхняя граница<br>номинального контактного<br>давления, МПа | Нагрузка<br>$N$ , Н | Верхняя граница<br>номинального контактного<br>давления, МПа |
|---------------------|--|---------------------|--|
| 20                  | 0,1  | 1000                | 5  |
| 40                  | 0,2  | 1200                | 6  |
| 100                 | 0,5  | 1400                | 7  |
| 200                 | 1,0  | 1600                | 8  |
| 400                 | 2,0  | 1800                | 9  |
| 600                 | 3,0  | 2000                | 10   |
| 800                 | 4,0  | –                   | –  |

*Примечание* – Радиус ролика – 0,002 м; номинальная площадь контакта –  $2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>

В процессе трения и механического изнашивания поверхности будет происходить увеличение радиуса контакта и, следовательно, снижение давления.

При оценке триботехнических свойств СМ контакт тел принимается упругим, при этом площадь контакта не зависит от давления.

2 Расчет контактного давления при линейном контакте ролика с плоскостью (рисунок 3).

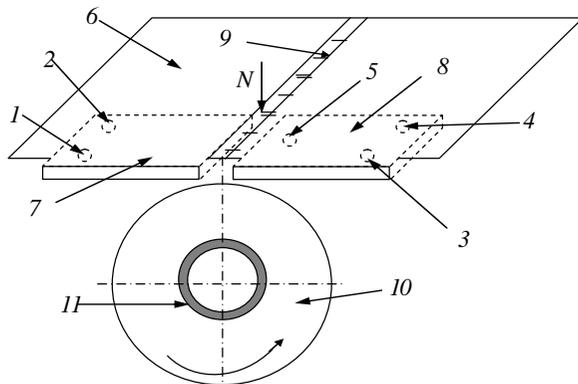


Рисунок 3 – Испытания по схеме «ролик – плоскость»:

1, 3 – токовые электроды; 2, 4 – потенциальные электроды; 5 – термопара; плоскость 6 выполнена в виде двух образцов 7 и 8, разделённых слоем диэлектрика 9; вал – ролик 10 с диэлектрическим вкладышем 11 касается одновременно сразу обоих образцов

Расчет полуширины пятна контакта осуществляется из классической теории Герца [4].

Оценка среднего контактного давления осуществляется по формуле

$$p = p^* / 2a, \quad (2)$$

где  $P^*$  – погонная нагрузка, Н/м;

$a$  – полуширина пятна контакта, м.

Погонная нагрузка определяется из соотношения

$$p^* = N/d, \quad (3)$$

где  $N$  – нагрузка, Н;

$d$  – ширина ролика, м.

Полуширина пятна контакта рассчитывается по формуле

$$a = (4P^*R / \pi E)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $R$  – эффективный радиус ролика, м;

$E$  – модуль упругости, Па.

Эффективный радиус определяется из соотношения

$$(1/R) = (1/R_1) + (1/R_2), \quad (5)$$

где  $R_1$  – радиус плоскости ( $R_1 = \infty$ );

$R_2$  – радиус ролика ( $R = R_2 = 20$  мм), поэтому  $(1/R) = (1/R_2)$ .

В таблице 2 приведены значения полуширины пятна контакта и верхней границы среднего контактного давления. В процессе трения и изнашивания поверхности будет происходить увеличение радиуса контакта и, следовательно, снижение давления.

Таблица 2 – Расчет контактного давления при линейном контакте тел

| Нагрузка<br>$N$ , Н | Погонная нагрузка<br>$P^*$ , Н/м | Полуширина пятна<br>контакта $a$ , мкм | Контактное<br>давление $p$ , МПа |
|---------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|
| 98                  | 9800                             | 30,7                                   | 160                              |
| 196                 | 19600                            | 40                                     | 200                              |
| 294                 | 29400                            | 53,2                                   | 276                              |
| 490                 | 49000                            | 68,6                                   | 357                              |
| 663                 | 66250                            | 79,8                                   | 415                              |
| 960                 | 96000                            | 96                                     | 500                              |
| 1274                | 127400                           | 110,7                                  | 575                              |
| 1588                | 158800                           | 123,5                                  | 643                              |

В таблицах 3 и 4 приведены значения регистрируемых параметров, по которым можно провести оценку противозадирных свойств моторных масел.

Таблица 3 – Параметры противозадирной стойкости моторных масел

| Материал                | Средние значения параметров | Номинальное контактное давление, МПа |      |                |      |      |      |      |                |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------|----------------|------|------|------|------|----------------|
|                         |                             | 0,5                                  | 1    | 2              | 3    | 4    | 5    | 6    | 7              |
| Дистиллированная вода   | $f$                         | 0,45                                 | 0,39 | 1,23           | –    | –    | –    | –    | –              |
|                         | $T$ , °С                    | 25                                   | 34   | 55             | –    | –    | –    | –    | –              |
|                         | $R_{c \max}$ , Ом           | 0,160                                | 0,02 | $6 \cdot 10^6$ | –    | –    | –    | –    | –              |
|                         | $R_{c \min}$ , Ом           | 0,002                                | 0,02 | 0,001          | –    | –    | –    | –    | –              |
| <i>Полусинтетика</i>    |                             |                                      |      |                |      |      |      |      |                |
| Arega 10w-40, API SI/CF | $f$                         | 0,1                                  | 0,08 | 0,08           | 0,1  | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,5            |
|                         | $T$ , °С                    | 26                                   | 36   | 56             | 105  | 130  | 148  | 172  | 205            |
|                         | $R_{c \max}$ , Ом           | 0,52                                 | 0,11 | 0,05           | 0,08 | 0,07 | 0,09 | 0,05 | $6 \cdot 10^6$ |
|                         | $R_{c \min}$ , Ом           | 0,28                                 | 0,06 | 0,04           | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | 0,001          |
| Castrol 10w-40,         | $f$                         | 0,25                                 | 0,16 | 0,13           | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,1  | 0,35           |
|                         | $T$ , °С                    | 28                                   | 38   | 40             | 45   | 72   | 100  | 122  | 108            |

|              |                   |     |     |     |      |     |     |     |     |
|--------------|-------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| API<br>SF/CL | $R_{c \max}$ , Ом | 6,1 | 4,6 | 6,1 | 15,7 | 1,2 | 2,6 | 3,5 | 16  |
|              | $R_{c \min}$ , Ом | 3,5 | 2,3 | 3,2 | 11,5 | 0,9 | 1,6 | 0,8 | 0,6 |

Таблица 4 – Параметры противозадирной стойкости моторных масел

| Материал                          | Средние значения параметров | Номинальное контактное давление, МПа |       |       |       |                |                |       |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|-------|
|                                   |                             | 4                                    | 5     | 6     | 7     | 8              | 9              | 10    |
| Гудрон                            | $f$                         | 0,04                                 | 0,1   | 0,11  | 0,12  | 0,47           | –              | –     |
|                                   | $T$ , °С                    | 62                                   | 120   | 132   | 158   | 165            | –              | –     |
|                                   | $R_{c \max}$ , Ом           | 0,2                                  | 0,005 | 0,002 | 0,002 | $6 \cdot 10^6$ | –              | –     |
|                                   | $R_{c \min}$ , Ом           | 0,04                                 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001          | –              | –     |
| <i>Полусинтетика</i>              |                             |                                      |       |       |       |                |                |       |
| ТНК<br>10w–40,<br>API<br>SG/CF    | $f$                         | 0,11                                 | 0,1   | 0,09  | 0,09  | 0,12           | 0,27           | –     |
|                                   | $T$ , °С                    | 45                                   | 55    | 60    | 70    | 75             | 180            | –     |
|                                   | $R_{c \max}$ , Ом           | 0,25                                 | 0,56  | 0,09  | 0,02  | 0,002          | $6 \cdot 10^6$ | –     |
|                                   | $R_{c \min}$ , Ом           | 0,04                                 | 0,09  | 0,04  | 0,005 | 0,001          | 0,001          | –     |
| Mannol<br>15w–40,<br>API<br>SF/CD | $f$                         | 0,11                                 | 0,11  | 0,11  | 0,11  | 0,11           | 0,11           | 0,45  |
|                                   | $T$ , °С                    | 102                                  | 110   | 120   | 145   | 155            | 170            | 180   |
|                                   | $R_{c \max}$ , Ом           | 0,09                                 | 1,5   | 3,8   | 6,1   | 6,2            | 1,9            | 0,22  |
|                                   | $R_{c \min}$ , Ом           | 0,04                                 | 1,3   | 3,5   | 4,6   | 4,7            | 0,72           | 0,09  |
| <i>Минеральное масло</i>          |                             |                                      |       |       |       |                |                |       |
| M10Г2к                            | $f$                         | 0,1                                  | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1            | 0,1            | 0,1   |
|                                   | $T$ , °С                    | 67                                   | 79    | 92    | 92    | 100            | 105            | 95    |
|                                   | $R_{c \max}$ , Ом           | 0,02                                 | 0,04  | 0,05  | 0,05  | 0,05           | 50             | 20000 |
|                                   | $R_{c \min}$ , Ом           | 0,03                                 | 0,016 | 0,006 | 0,04  | 0,03           | 24             | 13000 |

В результате комплексного анализа регистрируемых параметров: коэффициента трения, контактного сопротивления и температуры от давления установлено, что по возрастанию противозадирных свойств, исследуемые моторные масла можно расположить в ряд: полусинтетика – Agesa 10w-40 API SI/CF, ТНК 10w-40 API SG/CF, Castrol 10w-40 API SF/CL, Mannol 15w-40 API SF/CD; минеральное масло – M10Г2к.

## 2 Оборудование, принадлежности, образцы

В работе используются машина трения СМТ, вольтметры, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), ПЭВМ, датчики, образцы (ролик, частичный вкладыш), пробы смазочных материалов, растворитель (ацетон или спирт), ветошь.

### 3 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с блок-схемой и методикой измерения противозадирных свойств СМ.

2 Подготовить образцы роликов и сегментов для проведения исследований. Для этого шлифовать их мелкодисперсной наждачной шкуркой до достижения среднеарифметического отклонения профиля  $R_a = 0,02 \dots 0,08$  мкм (11–12-й класс шероховатости по ГОСТ 2789–73). Чем меньше шероховатость, тем выше точность измерения контактного сопротивления  $R_c$ .

3 Подготовить образцы сегментов для измерения температуры  $T$  и контактного сопротивления  $R_c$  в соответствии с рисунком 1 (для измерения контактного сопротивления по четырехпроводной электрической схеме). Для этого просверлить четыре отверстия диаметром 2,5 мм и нарезать резьбу М3. Ввернуть в отверстия четыре винта и припаять к ним провода. Для крепления термопары в сегменте просверлить отверстие.

4 Обезжирить растворителем (спирт, ацетон) металлические поверхности контактирующих тел и протереть их насухо ветошью.

5 Произвести ступенчатое изменение нагрузки (в соответствии с рядом значений контактных давлений, приведенных в таблицах 1, 2). Для оценки моторных масел выбираем схему испытаний «ролик – сегмент», для трансмиссионных масел – схему «ролик – плоскость» (т. к. уровень контактного давления значительно выше).

6 Тумблер «Сеть» источника питания переключить в положение «Вкл.». При этом должна загореться сигнальная лампочка.

7 Перевести источник питания в режим источника тока. Для чего установить резистором-переключателем на передней панели источника питания максимальное значения напряжения и получить требуемое значение тока (50 мА).

8 Тумблер «Сеть» вольтметра переключить в положение «Вкл.» и выбрать диапазон измерения напряжения с учетом того, что его максимальное значение составляет 50 мВ.

9 Проверить правильность работы электрической схемы путём поднятия сегмента и измерения падения напряжения в контакте, которая должна составлять 50 мВ.

10 Включить ПЭВМ и АЦП. Запустить программу измерения.

11 Опустить сегмент на ролик и измерить падение напряжения между сопряжёнными поверхностями в статике без СМ, характерную для металлической проводимости «сухого» контакта.

12 Измерить зависимость падения напряжения в контакте от нагрузки  $N$ . Для чего в нескольких контрольных точках записать значения падения напряжения (на вольтметре) и определить по таблице соответствия измеряемой контактной разности потенциалов и значения контактного сопротивления.

13 Сравнить значения регистрируемых параметров, определяемых вручную, с рассчитанными на ПЭВМ.

14 Поместить исследуемый СМ под ролик (см. рисунок 1) и установить скорость вращения ролика 0,5 м/с.

15 Запустить программу для регистрации измеряемых параметров.

16 С интервалом 3–5 мин в соответствии с рядом выбранных контактных давлений (см. таблицы 1, 2) произвести ступенчатое нагружение, до тех пор, пока величина контактного сопротивления  $R_c$  не снизится до уровня, характерного для «сухой» поверхности. При этом имеет место резкое увеличение флуктуаций значений  $R_c$  до верхней границы, задаваемой электрической схемой, сопровождаемое увеличением температуры и коэффициента трения и характерным для задира поверхностей звуком.

17 Заполнить таблицу, содержащую данные, отражающие зависимость измеряемых параметров (контактное сопротивление, температура, коэффициент трения) от контактного давления (см. таблицы 3, 4). По полученным данным определить критическую нагрузку (давление) разрушения ГСС для каждого СМ.

18 Построить для исследуемых СМ ряд по убыванию противозадирных свойств.

### **Содержание отчета**

Наименование и цель работы; блок-схема устройства, машина трения СМТ, четырехпроводная электрическая схема; результаты измерений: зависимости регистрируемых параметров от контактного давления для исследуемых СМ; выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1 Описать блок-схему устройства и методику расчёта среднего контакт-

ного давления.

2 Описать электрическую схему измерения контактного сопротивления.

3 Описать методику оценки противозадирных свойств СМ.

4 Объяснить увеличение толщины ГСС с увеличением контактного давления.

5 Объяснить снижение регистрируемой температуры с увеличением толщины ГСС.

6 Сущность метода электрофизического зондирования для оценки противозадирных свойств граничных смазочных слоёв.

7 Как определить критическое значение контактного давления  $p_{кр}$ , при котором происходит разрушение ГСС?

### Список литературы

1 **Богданович, П. Н.** Трение и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск : Выш. шк., 1999. – 374 с.

2 **Ахматов, А. С.** Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 389 с.

3 **Хольм, Р.** Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Изд-во «Иностранная литература», 1961. – 464 с.

4 **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов – М. : Машиностроение, 1977. – 525 с.

5 **Пат. 11306 РБ, МПК<sup>7</sup> G 01 N 3/56, G 01 N 27/00.** Способ оценки противозадирных и противоизносных свойств смазочного материала / С. В. Короткевич, О. В. Холодилов, В. В. Кравченко ; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. ун-т трансп. – № а 20060981 ; заявл 06.10.2006 ; зарегистр. 05.08.2008, Нацыян. цэнтр інтэлект. уласн. – 6 с. : ил.

Учебное издание

*ХОЛОДИЛОВ Олег Викторович*  
*КОРОТКЕВИЧ Сергей Васильевич*

**Методы и средства технической диагностики  
(оптический, магнитный, электрический)**

Лабораторный практикум

Редактор *Т. М. Ризевская*  
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 20.01.2009 г. Формат 60x84/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,84. Тираж 95 экз.  
Зак. № . Изд. № 31.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Белорусский государственный университет транспорта:  
ЛИ № 02330/0133394 от 19.07.2004 г.  
ЛП № 02330/0148780 от 30.04.2004 г.  
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34